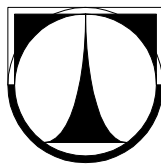


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2010

Bc. Michal Podzimek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Mechatronika

**Tlumení vibrací pomocí piezoelektrického bimorfu připojeného
k obvodu se zápornou kapacitou**

**Suppression of vibrations using piezoelectric bimorph connected
to circuit realizing negative capacity**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Michal Podzimek

Vedoucí: doc. Ing. Pavel Mokrý, Ph.D.

Konzultant : doc. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.

V Liberci 21. 5. 2010

Originální zadání práce (vložit)

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Chtěl bych vyjádřit poděkování vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Pavlu Mokrému, Ph.D. za vedení a pomoc při tvorbě této diplomové práce. Dále také děkuji doc. Mgr. Jiří Erhartovi, Ph.D. za všechny užitečné rady a pomoc při realizaci měření v piezoelektrické laboratoři II katedry fyziky.

A v neposlední řadě děkuji svým rodičům za morální i finanční podporu během celého mého studia.

Anotace

Diplomová práce řeší tlumení vibrací pomocí piezoelektrického bimorfu z PZT keramiky připojeného ke zpětnovazebnímu elektronickému obvodu s operačním zesilovačem. Obvod s operačním zesilovačem realizuje zápornou kapacitu a jeho funkcí je řídit elastické vlastnosti keramiky, které lze popsat pomocí Youngova modulu. Nastavením zpětnovazebního obvodu lze dosáhnout poklesu efektivní dynamické hodnoty Youngova modulu. To v konečném důsledku znamená větší útlum přenosu vibrací skrz piezoelektrický materiál.

Cílem diplomové práce je realizovat a ověřit funkci systému tlumení vibrací ve frekvenční oblasti pokrývající rezonanční frekvenci piezoelektrického bimorfu a provést měření kapacity a měření výchylky volného konce piezoelektrického bimorfu a přenosu vibrací v případě odpojeného a připojeného zpětnovazebního obvodu. Frekvenční závislosti přenosu vibrací a kapacity naměřené v obou případech jsou porovnány a diskutovány. Ze změny průběhu frekvenčních závislostí přenosu vibrací je odhadnuta změna efektivní dynamické hodnoty Youngova modulu v pružnosti piezoelektrického bimorfu.

Klíčová slova:

Tlumení vibrací

Piezoelektrický bimorf

Obvod se zápornou kapacitou

Měření kapacity

Annotation

Diploma thesis is focused on a system for the suppression of vibrations. The system consists of a piezoelectric bimorph made of PZT ceramics connected to an electronic circuit with an operational amplifier. Electronic circuit with the operational amplifier realizes a negative capacity and its function is to control the elastic properties described by the Young's modulus. It is possible to achieve the reduction of effective dynamic value of the Young's modulus by setting the proper circuits parameters. Finally, the transmission of vibrations through the piezoelectric actuator is markedly decreased.

The main objective of this Diploma thesis is to realize a system for the suppression vibration in the frequency range covering the resonance frequency of the piezoelectric bimorph and to carry out measurements of capacitance, displacements of the free end of the piezoelectric bimorph and the transmissibility of vibrations through the bimorph in the two cases when the shunt circuit with the negative capacitance is disconnected from and connected and to the bimorph. Frequency dependencies of the transmissibility of vibrations and capacitance of the bimorph are compared and discussed. The change of the effective value of the Young's modulus of the piezoelectric bimorph is estimated from the change of the frequency dependencies of the transmissibility vibrations.

Keywords:

Suppression of vibrations

Piezoelectric bimorph

Circuit realizing negative capacitor

Capacitance measurement

Obsah

Úvod.....	8
1 Teoretická část.....	10
1.1 Piezoelektrický jev	10
1.2 Piezoelektrické stavové rovnice	11
1.3 Piezoelektrické materiály	12
1.4 Piezoelektrické kompozitní struktury	14
1.5 Využití piezoelektrických materiálů.....	15
1.6 Aktivní řízení elastických vlastností.....	15
1.7 Obvod se zápornou kapacitou.....	17
2 Praktická část	19
2.1 Sestavení obvodu se zápornou kapacitou	19
2.2 Ladění obvodu se zápornou kapacitou	20
2.3 Parametry piezoelektrického bimorfu	21
2.4 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem.....	22
2.4.1 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem - experiment	22
2.4.2 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem – teoretický výpočet.....	24
2.4.3 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem – teoretický výpočet včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou.....	27
2.5 Měření kapacity piezoelektrického bimorfu.....	28
2.5.1 Měření kapacity bimorfu na spektrálním analyzátoru	28
2.5.2 Měření kapacity piezoelektrického bimorfu pomocí lock-in zesilovače.....	29
2.6 Zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou.....	32
2.6.1 Zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou - experimentem	32
2.6.2 Zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou – výpočtem.....	33
2.7 Měření kapacity bimorfu připojeného k obvodu se zápornou kapacitou	34
3 Diskuze výsledků	36
Závěr.....	37
Použitá literatura:	38
Seznam příloh:	39
Přílohy	40

Úvod

Technický rozvoj společnosti přináší kromě nepochybných výhod i jisté nevhodné vlivy. Za takové lze označit působení rozvoje společnosti na kvalitu životního prostředí. Tato kvalita je posuzována z několika aspektů a jedním z nejdůležitějších jsou okolní hluk či vibrace. Otázka jak snížit intenzitu hluku či vibrací se proto přirozeně stává významnější.

Východisko pro problém s potlačením hluku či vibrací představují v současnosti dva odlišné způsoby, které se používají, a bez vynaložení většího úsilí, je najde ve svém okolí každý pozornější pozorovatel.

Prvním způsobem je pasivní potlačení hluku využívající zvukově absorpční materiály, např. skelná vata, polyuretanová pěna nebo jiné porézní materiály. V případě pasivního potlačení přenosů se využívá viskoelastických materiálů např. pryže nebo speciální polymerní fólie. Pasivní způsob tlumení hluku nebo vibrací je díky své nízké ceně nejdostupnější a také nejpožívanější. Hlavní nevýhodou těchto systémů je malá účinnost při nižších frekvencích. Omezujícím faktorem pro použití těchto systémů je zvyšující se robustnost pro dostatečné odhlučnění.

Druhou možností je aktivní potlačení hluku. Princip spočívá v detekování hluku, který chceme potlačit, mikrofonom a následném vysílání do prostoru zvukové vlny se stejnou amplitudou, ale s opačnou fází pomocí reproduktoru. Díky interferenci zvukových vln ve vzduchu se výsledná zvuková vlna oproti původnímu hluku jeví jako potlačená. Výhodou tohoto způsobu je účinné potlačení hluku v nízkých kmitočtech. Díky tomu, že celý proces tlumení zajišťuje řídicí elektronika, jsou tyto systémy složité vzhledem k realizaci – což je jejich nevýhoda. Obdobným způsobem je možné aktivně potlačit přenos vibrací. Vibrace jsou snímány senzorem, např. akcelerometrem, a tlumeny na jiném místě aktuátorem.

Přirozeným vývojem se zdá být využití výhod obou systémů a eliminování nevýhod při kombinování aktivního a pasivního způsobu tlumení hluku. V realitě se však toto kombinování nejeví být příliš praktické. Hledání nových způsobů tlumení vibrací by mohlo být řešením dané situace. Jedním z nových způsobů je využití semi-aktivního tlumení hluku.

Semi-aktivní tlumení hluku využívá principu odrazu zvukových vln na rozhraní prostředí, na které hluk dopadá. Část zvukové vlny představující hluk prostředím projde a část se odrazí. Poměr části vlny, která se odrazí a která projde prostředím, je určující pro tlumení hluku. Tento poměr však lze měnit použitím metody aktivního řízení elastických vlastností včetně využití piezoelektrických materiálů.

Piezoelektrické materiály vykazují přímý nebo inverzní piezoelektrický jev. Přímý piezoelektrický jev nastane tehdy, když působíme mechanickým napětím na piezoelektrický element, který díky tomu generuje elektrický náboj na elektrodách. Elektrický náboj na elektrodách je přímo úměrný působícímu mechanickému napětí. Inverzní piezoelektrický jev nastává po přivedení elektrického napětí na elektrody piezoelektrického elementu. Element se deformuje přímo úměrně přivedenému elektrickému napětí. Výhodou systémů s piezoelektrickými materiály je schopnost využití přímého a inverzního piezoelektrického jevu v jednom okamžiku.

Princip aktivního řízení elastických vlastností s využitím piezoelektrických materiálů vychází z následující úvahy. Při působení mechanické síly (či napětí – jejímž zdrojem je hluk) na piezoelektrický materiál se na jeho elektrodách generuje elektrický náboj, který je přiveden do obvodu se zápornou kapacitou. Obvod se zápornou kapacitou řídí elektrické napětí na elektrodách piezoelektrického materiálu. Při správném nastavení obvodu se zápornou kapacitou se příspěvek z okolního prostředí a z obvodu se zápornou kapacitou sečte tak, že dojde k potlačení hluku.

V diplomové práci se celý systém tlumení vibrací skládá z piezoelektrického aktuátoru – tzv. bimorfu. Bimorf je na jednom konci vetknut a připevněn k elektrodymanickému zdroji vibrací (shakeru) a je studován přenos vibrací na volně kmitající konec bimorfu. Tlumení přenosu vibrací na volný konec bimorfu zajišťuje obvod se zápornou kapacitou. Na celý tento systém lze nahlížet i tak, že obvod se zápornou kapacitou se vzhledem k piezoelektrickému aktuátoru chová jako externí kapacita. Z tohoto důvodu je klíčová znalost kapacity piezoelektrického aktuátoru bez a včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou.

1 Teoretická část

V této části diplomové práce jsou shrnuty základní vlastnosti piezoelektrických materiálů, jejich uspořádání do kompozitních struktur a jejich využití. Dále je zde popsán princip aktivního řízení elastických vlastností těchto struktur při připojení zpětnovazebního obvodu a jeho využívání pro tlumení přenosu vibrací.

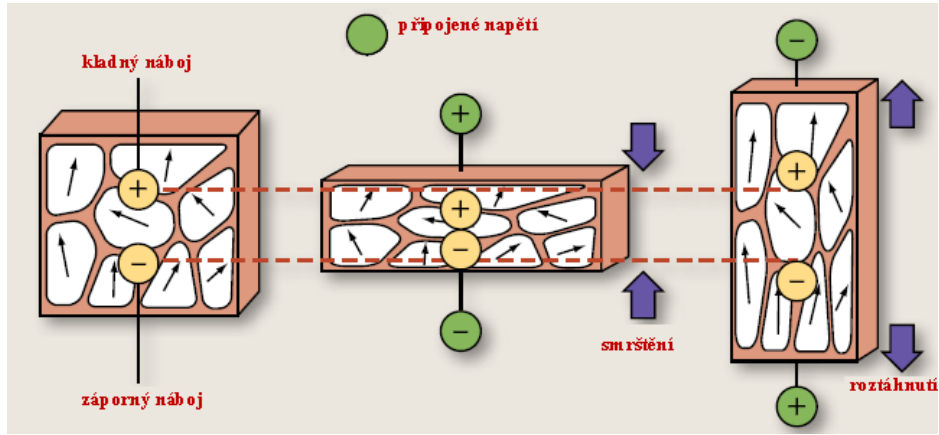
1.1 Piezoelektrický jev

V letošním roce je tomu právě 130 let od chvíle, kdy byl bratry Pierrem a Jacquem Curiovými poprvé experimentálně prokázán a popsán na povrchu krystalů turmalínu vznikající elektrický náboj vzniklý v důsledku mechanického působení [1]. Tento jev se nazývá přímý piezoelektrický jev. Elektrický náboj je přímo úměrný vyvinutému mechanickému napětí. O rok později bratři Curiové zjistili, že existuje i tzv. nepřímý piezoelektrický jev spočívající ve vytvoření mechanické deformace krystalu po působení elektrickým polem.

Mikroskopické vysvětlení příčiny piezoelektrického jevu lze vyložit tímto způsobem:

- při přímém piezoelektrickém jevu se vlivem mechanického působení na piezoelektrický materiál ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce o různé vzdálenosti, díky tomu pozorujeme na elektrodách změnu v celkovém elektrickém náboji,
- při nepřímém piezoelektrickém jevu způsobuje připojené elektrického pole na piezoelektrický materiál posunutí iontů a následnou mechanickou deformaci (viz Obr. 1).

Posun opačných nábojů v krystalové mřížce takovým způsobem aby byla piezoelektrická látka zpolarizována a následně na ní byl elektrický náboj lze pozorovat u nevodivých krystalických látek bez středu souměrnosti.



Obr. 1: *Nepřímý piezoelektrický jev- piezoelektrický materiál je vystaven přiloženému elektrickému napětí různých polarit*

1.2 Piezoelektrické stavové rovnice

Piezoelektrické jevy se dají popsat lineárními stavovými rovnicemi mezi mechanickými veličinami - složkami tenzoru deformace S_{kl} ($k, l = 1, 2, 3$) a tenzoru napětí T_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) a elektrickými veličinami - složkami vektoru elektrického pole E_j ($j = 1, 2, 3$) a složkami vektoru elektrického posunutí D_i ($i = 1, 2, 3$). Elastické vlastnosti látek popisují elastické moduly c_{ijkl} či koeficienty s_{ijkl} . Dielektrické vlastnosti charakterizují impermitivita β_{ij} a permitivita ϵ_{ij} . Permitivita ϵ_{ij} je součin relativní permitivity ϵ_r a permitivity vakua ϵ_0 . Piezoelektrické koeficienty $d_{j\lambda}$ či $g_{j\lambda}$ či piezoelektrické moduly $e_{j\lambda}$ a $h_{j\lambda}$ charakterizují piezoelektrické vlastnosti. Všechny tyto veličiny spojují čtyři soustavy piezoelektrických stavových rovnic popisující přímý a nepřímý piezoelektrický jev.

$$T_\lambda = c^E_{\lambda\mu} S_\mu - e_{i\lambda} E_j \quad (1)$$

$$D_i = e_{i\mu} S_\mu + \epsilon^S_{ij} E_j \quad (2)$$

$$T_\lambda = c^D_{\lambda\mu} S_\mu - h_{i\lambda} D_j \quad (3)$$

$$E_i = -h_{i\mu} S_\mu + \beta^S_{ij} D_j \quad (4)$$

$$S_\lambda = s^E_{\lambda\mu} T_\mu + d_{i\lambda} E_j \quad (5)$$

$$D_i = d_{i\mu} T_\mu + \epsilon^T_{ij} E_j \quad (6)$$

$$S_\lambda = s^D_{\lambda\mu} T_\mu + g_{i\lambda} D_j \quad (7)$$

$$E_i = -g_{i\mu} T_\mu + \beta^T_{ij} D_j \quad (8)$$

kde $\lambda, \mu = 1, 2, \dots, 6$ a $i, j = 1, 2, 3$.

1.3 Piezoelektrické materiály

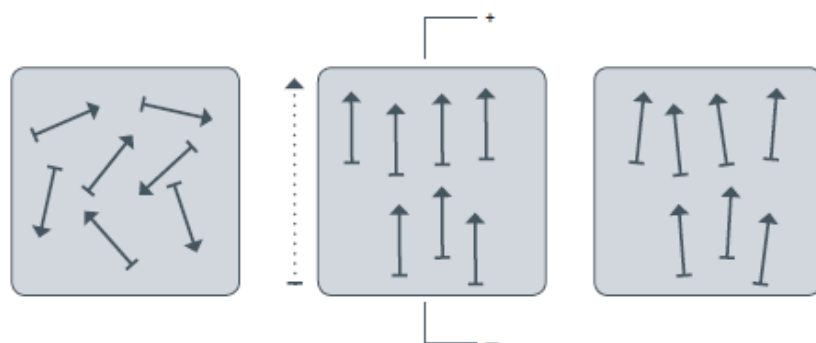
Za piezoelektrický materiál můžeme považovat každý materiál, jehož krystalová mříž nemá střed symetrie. Tato podmínka znamená, že ze všech 32 krystalových tříd vykazuje piezoelektrinu pouze 20 tříd. Nejvýznamnější piezoelektrický materiál je bezpochyby krystalický kysličník křemičitý SiO_2 známý jako křemen. Křemen je užíván především jako piezoelektrický rezonátor v oscilátorech kvůli vysoké stálosti frekvence, malým ztrátám vnitřním třením, vhodným koeficientem elektromechanické vazby a relativně malou teplotní závislostí rezonančního kmitočtu v širokém rozmezí teplot. Vlastnosti křemene je možné ovlivnit vhodným řezem, rozmístěním elektrod a geometrickými rozměry. Křemenné krystaly jsou:

- a) přírodní – mající velké rozměry, často nejsou čisté a vykazují strukturní defekty
- b) syntetické – připravují se hydrotermální syntézou při vysoké teplotě a tlaku

Vedle křemene se používá celá řada dalších krystalů, zmiňme například: niobát lithia LiNbO_3 , tantalát lithia LiTaO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_3$ nebo také $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_3$.

Kromě krystalů je velmi široce používána i polarizovaná piezoelektrická keramika. První známá piezoelektrická keramika je titaničitan barnatý BaTiO_3 . Často využívané jsou piezoelektrické keramické materiály na bázi tuhých roztoků zirkoničitanu a titaničitanu olovnatého $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ známé jako keramika PZT.

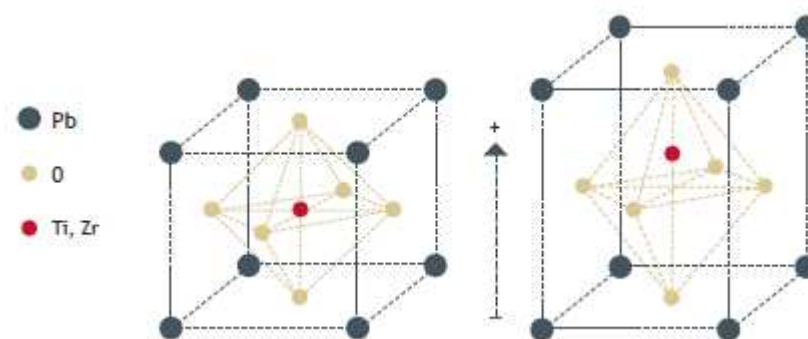
PZT se skládá z jednotlivých silně piezoelektrických zrn. Materiál vykazuje izotropní vlastnosti. Aby se materiál stal piezoelektrickým, je na něj působeno silným elektrickým polem. To způsobí polarizaci keramiky – polární osy piezoelektrických zrn se vychýlí ve směru přiloženého elektrického pole. Po polarizaci má PZT keramika anizotropní vlastnosti.



Obr. 2 Změna izotropní struktury v anizotropní – obrázek vlevo znázorňuje náhodně uspořádaná piezoelektrická zrna, na prostředním obrázku jsou zpolarizovaná piezoelektrická zrna elektrickým polem, na obrázku vpravo je zbytková polarizace po odpojení elektrického pole – převzato z [2].

Piezoelektrické keramiky mají obvykle tzv. perovskitovskou krystalovou strukturu [3]. Důležitým pojmem pro piezoelektrickou keramiku je tzv. Curierova teplota Θ_c . Nad touto teplotou jsou totiž krystaly PZT v tzv. kubické fázi, mají střed symetrie, a proto nevykazují spontánní polarizaci. Při překročení Curierovy teploty přechází PZT fázovým přechodem do paraelektrické fáze. Teplota tohoto přechodu je podstatným činitelem pro použití PZT keramiky. Pod Curierovou teplotou se atomy ve středu vychýlí ze své polohy a v materiálu může vznikat elementární dipól.

Na Obr. 3 je znázorněna perovskitovská struktura piezoelektrické keramiky PZT. Vlevo je vykreslena krystalová struktura PZT nad Curierovou teplotou a vpravo je krystalová struktura PZT pod Curierovou teplotou.



Obr. 3: Perovskitovská struktura keramiky PZT- vlevo je znázorněna krystalová struktura nad Curierovou teplotou, vpravo pod Curierovou teplotou- převzato z [4]

Kubická fáze je paraelektrická. Při poklesu teploty pod Curieovu teplotu Θ_c se kubická struktura deformuje na tetragonální. Látka se stává feroelektrickou, před zpolarizováním keramiky však stále není piezoelektrická.

Vlastnosti piezoelektrické keramiky $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ záleží na procentním poměru PbTiO_3 a PbZrO_3 v roztoku. Procentní zastoupení těchto dvou komponent se volí v blízkosti monotropního rozhraní, což je zhruba 48% PbTiO_3 a 52% PbZrO_3 . Složením piezoelektrické keramiky, popř. přidáním dalších příměsí je možné podstatně změnit piezoelektrické vlastnosti (např. koeficient elektromechanické vazby k_{33} v rozmezí 0,3 až 0,8).

Kromě piezoelektrických krystalů a piezoelektrické keramiky existují i tzv. polární polymery. Jsou to tenké vrstvy ve formě fólií, které jsou makroskopicky polarizované a vykazují piezoelektrické vlastnosti. Mezi tyto látky patří polyvinylidfluorid známý pod zkratkou PVDF.

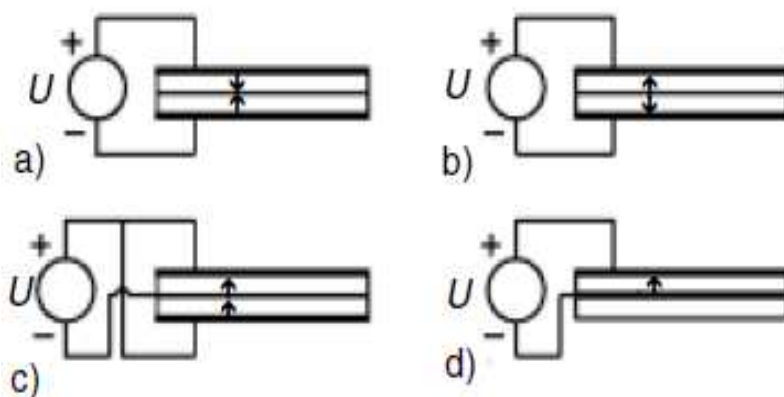
1.4 Piezoelektrické kompozitní struktury

Piezoelektrické kompozitní struktury jsou vhodně vybroušené piezoelektrické látky do tvarů destiček nebo tyčinek osazené dvěma či více elektrodami. Jejich tvar je uzpůsoben tak, aby mohli co nejefektivněji převádět elektrické napětí na sílu, moment nebo naopak. Tyto struktury lze rozdělit do těchto skupin:

- a) Bimorfy – se skládají z dvou vrstev piezoelektrického materiálu a používají se jako aktuátory například pro zvedání jehel v pletacích strojích,
- b) Unimorfy – jsou kovové destičky s nalepenou vrstvou PZT keramiky uspořádané do kruhové konfigurace které se používají jako sirény nebo bzučáky,
- c) Polymorfy – mají více než dvě vrstvy PZT keramiky, což zvyšuje jejich účinnost převodu mechanické energie v elektrickou či naopak.

V diplomové práci byl použit jako aktuátor piezoelektrický bimorf, a proto budeme dále detailněji pojednávat právě o něm.

Piezoelektrický bimorf je plátek který se skládá ze dvou piezoelektrických vrstev mezi kterými je střední kovová elektroda (kovový plíšek). Na základě polarity připojeného elektrického napětí a následující polarizace prvků se rozděluje na bimorfy sériové – viz Obr. 4 a, b, paralelní – viz Obr. 4 c a zvláštní případ unimorf – viz Obr 4 d. Paralelní bimorfy vykazují při stejném připojení elektrického napětí dvakrát větší výchylku než bimorfy sériové. To je způsobeno tím, že u paralelního bimorfu se vlivem zapojení a polarizací vytváří dvojnásobné elektrické pole. Na vnější části piezoelektrických keramických plátek jsou naneseny uhlíkové elektrody a na povrchu bimorfu je speciální ochranný lak.



Obr. 4: Konfigurace bimorfů – a), b) sériové; c) paralelní; d) unimorf - převzato z [5]

1.5 Využití piezoelektrických materiálů

Za relativně nepříliš dlouhou dobu, kdy je znám piezoelektrický jev, se jeho využití rozšířilo do celé řady technických oborů. První praktická aplikace piezoelektrického jevu byla u konstrukce hloubkoměru v roce 1917. Bylo využito piezoelektrických vlastností křemenných destiček k buzení ultrazvukových vln v mořské vodě. V roce 1923 byli prvně použité piezoelektrické rezonátory pro stabilizaci kmitočtů vysokofrekvenčních oscilátorů. Rychle poté se piezoelektrické rezonátory staly nejčastějším používaným prvkem využívající piezoelektrický jev. Kromě rezonátorů určených k stabilizaci kmitočtů oscilátorů a realizace krystalových frekvenčních filtrů se piezoelektrický jev využívá v mnoha aplikacích. Nejčastěji se jedná o různé snímače sil, deformace, vibrací a teploty.

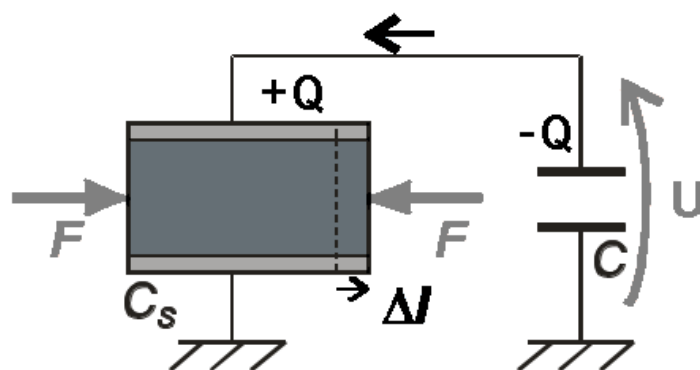
1.6 Aktivní řízení elastických vlastností

Jak už bylo krátce v úvodu zmíněno, ideou semi-aktivního tlumení vibrací je řízení elastických vlastností piezoelektrického materiálu provedeno pomocí obvodu se zápornou kapacitou (v kapitole 1.7 je podrobněji vyložen princip funkce obvodu se zápornou kapacitou). Piezoelektrický materiál v jednom časovém okamžiku využívá přímý a nepřímý piezoelektrický jev a funguje tedy zároveň jako detektor a aktuátor.

Řízení elastických vlastností piezoelektrického materiálu funguje na tomto principu: při mechanické deformaci (zapříčiněné vibracemi či hlukem) působící na piezoelektrický vzorek se díky přímému piezoelektrickému jevu na jeho elektrodách objeví elektrický náboj Q , tento náboj se přivádí do paralelně zapojeného obvodu se zápornou kapacitou, který můžeme považovat za externí kapacitu.

Externí kapacita je přicházejícím nábojem Q nabitá a na jejích elektrodách je napětí U . Toto napětí je rovno poměru záporné hodnoty přivedeného náboje Q a externí kapacity C . Napětí U je přivedeno na elektrody piezoelektrického vzorku C_s , což vlivem nepřímého piezoelektrického jevu dá příčinu vzniku mechanické deformaci vzorku.

Celková změna elastické tuhosti je součet deformace způsobenou mechanickou vibrací z okolí s mechanickou deformací vzniklou přivedeným napětím.

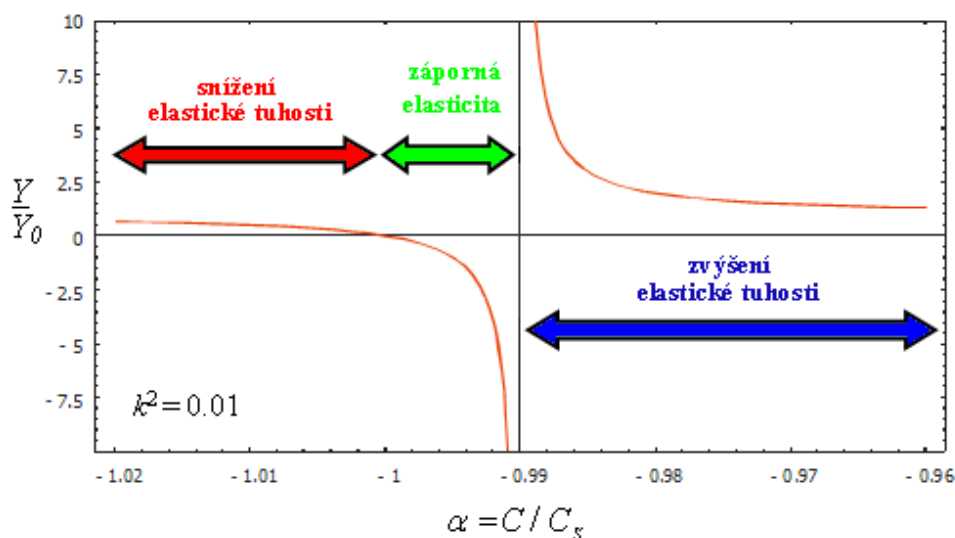


Obr. 5: Princip aktivního řízení elastických vlastností- k piezoelektrickému aktuátoru C_s je připojena externí kapacita C

Změnu elastické tuhosti popisuje Youngův modul pružnosti. V našem případě lze Youngův modul pružnosti určit z podílu deformace způsobené mechanickou vibrací z okolí s celkovou mechanickou deformací. Efektivní hodnota Youngova modulu Y piezoelektrického vzorku s připojenou externí kapacitou je pak (detailní odvození v Ref. [7]):

$$Y = Y_0 \left(\frac{1 + \alpha}{1 - k^2 + \alpha} \right) \quad (9)$$

kde Y_0 je hodnota Youngova modulu bez připojené externí kapacity, k je koeficient elektromechanické vazby (hodnota koeficientu elektromechanické vazby se pohybuje obvykle mezi nulou a jedničkou). Poměr kapacity externího kondenzátoru a kapacity piezoelektrického vzorku reprezentuje parametr $\alpha = C / C_s$. Ze vztahu pro Youngův modul pružnosti je patrné, že parametr α bude klíčový pro výslednou hodnotu modulu Y (viz Obr. 6).



Obr. 6: Změna Youngova modulu pružnosti v závislosti na poměru kapacit C/C_s , červenou barvou je vyznačena oblast snížení elastické tuhosti, modrou oblast zvýšení elastické tuhosti

Pokud je poměr kapacit $\alpha < -1$, dosahuje efektivní hodnota Youngova modulu Y nižších hodnot než hodnota Y_0 – materiál se stává měkčím. Když je poměr kapacit $\alpha > -1 + k^2$ je efektivní hodnota Youngova modulu Y větší než hodnota Y_0 a materiál se stává tvrdším. V těchto oblastech dochází k potlačení vibrací. Zvláštní případ nastane jestliže $-1 < \alpha < -1 + k^2$, pak $Y < 0$ a materiál se nachází v tzv. záporné elasticitě.

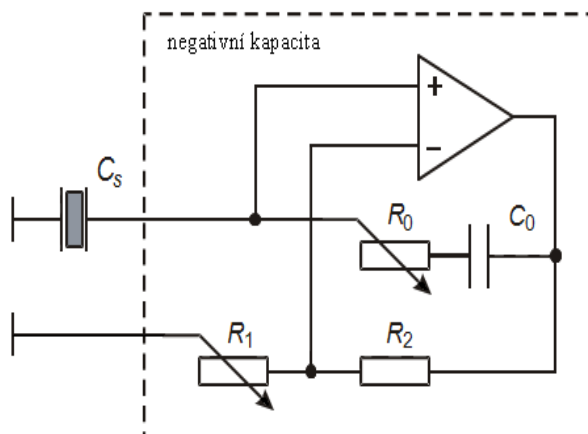
1.7 Obvod se zápornou kapacitou

Při připojení externí kapacity k piezoelektrickému elementu lze tedy výrazně měnit elastickou tuhost piezoelektrického materiálu. Externí kapacita je realizována obvodem se zápornou kapacitou. Snížování nebo zvyšování elastické tuhosti realizují dvě rozdílné zapojení obvodu se zápornou kapacitou využívající operačního zesilovače.

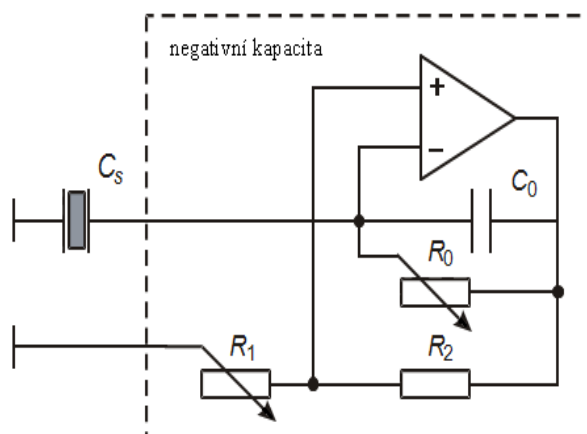
Obvod typu H (z anglického hardening) se využívá při zvyšování hodnoty Youngova modulu – čili pro potlačování vibrací. Tento obvod je stabilní pokud $\alpha > -1 + k^2$.

Pomocí obvodu typu S (z anglického softening) se dosáhne výrazného snížení Youngova modulu. Obvod typu S je stabilní při $\alpha < -1$.

Oba elektronické obvody jsou znázorněny na obrázcích 7 a 8 včetně zapojeního piezoelektrického elementu C_s .



Obr. 7: obvod se zápornou kapacitou typu **H** včetně piezoelektrického elementu



Obr. 8: obvod se zápornou kapacitou typu **S** včetně piezoelektrického elementu [6]

Princip obvodu se zápornou kapacitou je následující: na piezoelektrickém elementu C_s se vlivem mechanického buzení generuje záporné napětí. Toto napětí je přivedeno do operačního zesilovače, který při invertujícím zapojení otočí výstupní napětí o 180° . Kondenzátor C_0 je nabíjen kladným nábojem. Tento náboj se díky zapojení opět dostane na piezoelektrický element C_s .

Kapacita obou zpětnovazebních elektronických obvodů je dána tímto vztahem [7]:

$$C_{NC} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{C_0}{1 + j\omega R_0 C_0} \quad (10)$$

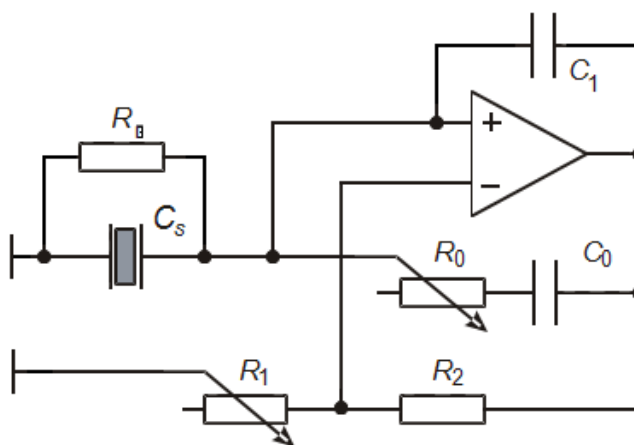
2 Praktická část

V této části práce je popsáno sestavení a ověření funkčnosti obvodu se zápornou kapacitou. Dále je zde popsáno měření a teoretický výpočet přenosu vibrací piezoelektrickým bimorfem, měření kapacity piezoelektrického bimorfu včetně a bez připojeného obvodu se zápornou kapacitou a zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou

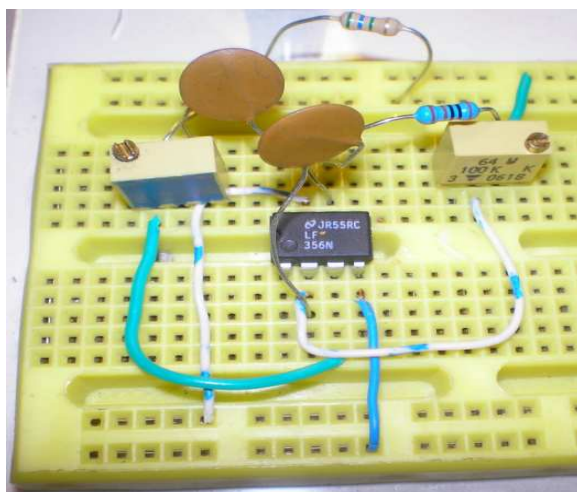
2.1 Sestavení obvodu se zápornou kapacitou

Realizace obvodu se zápornou kapacitou typu H byla provedena na nepájivém poli. Nejdůležitější a klíčovou součástí obvodu se zápornou kapacitou je operační zesilovač. Ze široké škály dostupných operačních zesilovačů byl vybrán typ LF 356 od firmy National Semiconductor [8]. Zesilovač je napájen stejnosměrným duálním napájením $\pm 18\text{V}$. V obvodu měl referenční kondenzátor C_0 hodnotu 47nF . Za rezistory R_1 a R_0 byli použity 25 otáčkové trimry. K ladění fáze signálu budícího bimorf je určen trimr R_0 s hodnotou $100\text{ k}\Omega$. Ladění amplitudy signálu realizuje trimr R_1 a má hodnotu $100\text{ k}\Omega$. Hodnota odporu R_2 je $10\text{ }\Omega$.

Mezi neinvertujícím vstup a výstup zesilovače byl do obvodu zapojen kondenzátor C_1 za účelem potlačení šumu zesilovače. Paralelně k piezoelektrickému bimorfu byl zapojen vyrovnávací rezistor R_B o hodnotě $2\text{M}\Omega$ který kompenzuje fázi kapacity piezoelektrického aktuátoru. Relativně dobrá dostupnost všech součástí potřebných k realizaci obvodu se zápornou kapacitou je významnou použitím tohoto zapojení. Schéma zapojení obvodu je zobrazeno na Obr. 9, realizace na nepájivém poli pak na Obr. 10.



Obr. 9: Schéma realizovaného zapojení obvodu se zápornou kapacitou typu H



Obr. 10: Realizace obvodu se zápornou kapacitou typu H na nepájivém poli

2.2 Ladění obvodu se zápornou kapacitou

Po realizaci obvodu se zápornou kapacitou na nepájivém poli se přistoupilo k jeho oživení a následnému ladění.

Do prvního vstupního kanálu osciloskopu INSTEK GDS – 2104 byl zapojen signál, kterým budíme z frekvenčního generátoru piezoelektrický element. Do druhého kanálu osciloskopu byl pomocí sondy přiveden signál z piezoelektrického bimorfu.

V této fázi bylo možné přistoupit k ladění obvodu se zápornou kapacitou. Obvod se ladil tak, aby dosáhl maximálního tlumení při první rezonanční frekvenci bimorfu. Prostřednictvím rezistorů R_I a R_O byl obvod nastavován tak, aby oba signály zobrazované v osciloskopu byli v opačné fázi a s minimálním rozdílem amplitudy. Největší amplitudové zesílení obvodu se nacházelo velmi blízko mezi stability. Proto bylo obtížné naladit obvod tak, aby byl stabilní a současně měl laděný signál maximální amplitudu. Při ladění byla zároveň sledována na optickém senzoru absolutní velikost výchylky volného a upevněného konce bimorfu. Naladění obvodu není jednoduché, protože se na piezoelektrickém bimorfu projevují, stejně jako na jednotlivých součástkách, teplotní změny.

2.3 Parametry piezoelektrického bimorfu

Piezoelektrický bimorf je vyrobený ve firmě Tesla Stropkov a.s., Slovensko. Piezoelektrické destičky jsou vyrobeny z měkké piezoelektrické keramiky PZT nesoucí obchodní název NCE55 která byla vyrobena v dánské firmě Noliac [4]. Vzhledem k větším výchylkám paralelních bimorfů oproti sériovým (viz kapitola 1.3) při stejném napětí bylo výhodnější použít právě paralelní bimorf. Rozměrové specifikace bimorfu jsou uvedeny v tabulce 1. Vybrané materiálové specifikace keramiky NCE55 jsou uvedeny v tabulce 2.

Rozměr	Hodnota [mm]
Volná délka	54
Celková délka	58
Šířka	4,3
Tloušťka PZT vrstvy	2 x 0,25
Tloušťka střední kovové elektrody	0,1

Tabulka 1: Rozměrové specifikace použitého piezoelektrického bimorfu

Veličina	Hodnota	Tolerance
Relativní dielektrická konstanta $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	5000	± 10%
Dielektrický ztrátový faktor $\text{tg } \delta [10^{-4}]$	220	
Koeficient elektromechanické vazby k_{33}	0,72	± 5%
Piezoelektrická nábojová konstanta $-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$	260	
Mechanický činitel jakosti Q_m	70	
Činitel elastické pružnosti $s_{11}^E [10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}]$	17	
Curieova teplota $T_C [^\circ]$	170	
Hustota $\rho [10^3 \text{ kg/m}^3]$	8	

Tabulka 2: Materiálové specifikace použitého piezoelektrického bimorfu včetně tolerancí

2.4 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem

V této kapitole je zjištěn přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem pomocí provedeného experimentu, teoretickým výpočtem a teoretickým modelem kde je simulován kmitající bimorf jako mechanický obvod se zapojenou pružinou a tlumičem.

2.4.1 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem - experiment

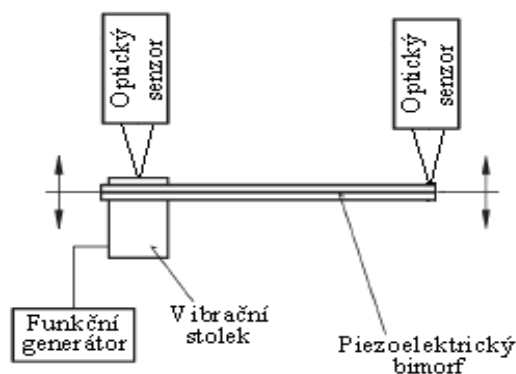
Pro ověření funkčnosti tlumícího obvodu je vhodné sledovat přenášení vibrací bimorfem při připojení a odpojení obvodu. Schopnost systému jak přenášet vibrace z jedné části na druhou popisuje veličina přenos vibrací což je poměr výstupní U_2 a vstupní U_1 amplitudy vibrace, čili přenos Tr je:

$$Tr = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \quad (11)$$

Při tlumení vibrací se snažíme, aby se vibrace ze zdroje nepřenášely na další části, tedy aby přenos dosahoval pokud možno nejmenších hodnot. V našem případě se jedná o snahu minimálního přenosu vibrací mezi upevněným a volným koncem bimorfu.

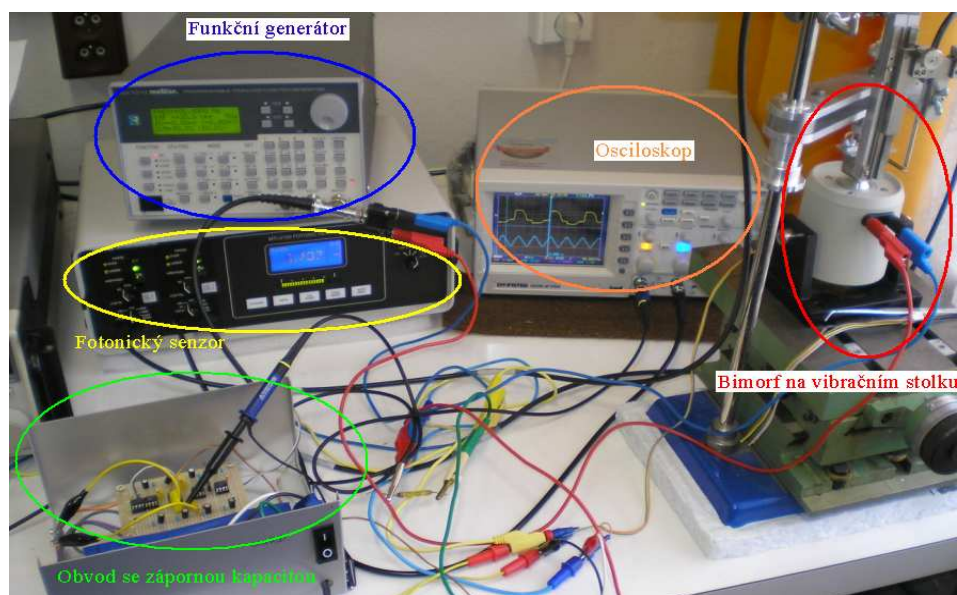
Postup pro měření přenosu byl následující. Piezoelektrický bimorf byl buzen mechanicky. Frekvenční generátor GX1010 METEX byl připojen k vibračnímu stolku, na který byl uchycen bimorf. Budící amplituda byla 20 V.

Výchylky volného a upevněného konce bimorfu byly změřeny pomocí fotonického senzoru MTI – 2100. Celý systém měření přenosu je znázorněn na Obr. 11.



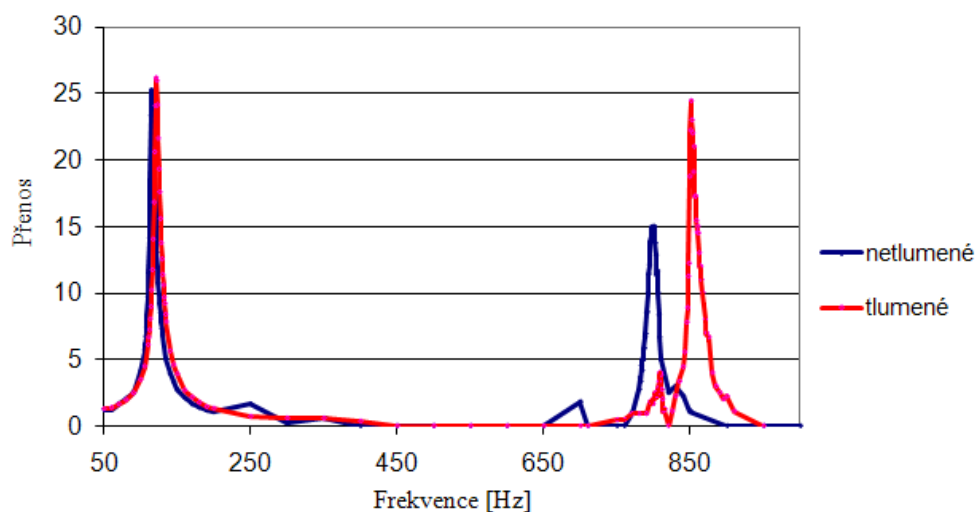
Obr. 11: *Systém pro měření přenosu vibrací bimorfu*

Fotografie celého systému pro měření přenosu vibrací bimorfu zapojeného podle Obr. 11 je znázorněna na Obr. 12.



Obr. 12: Fotografie zapojení pro měření přenosu bimorfu

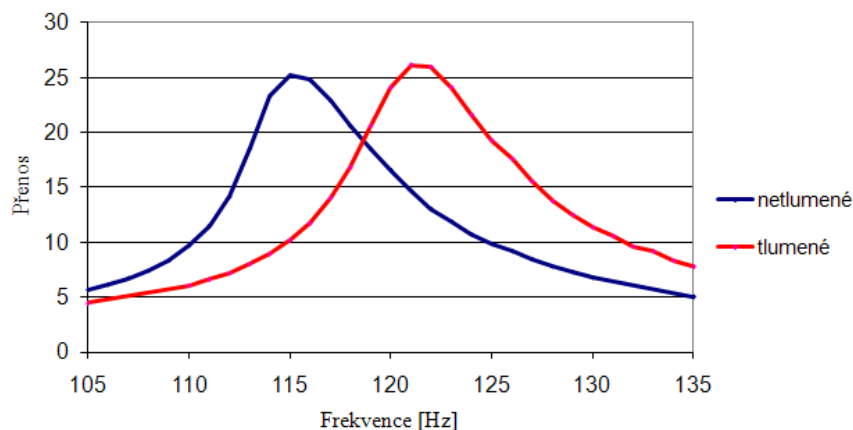
Ze změřených výchylek volného a upevněného konce bimorfu byl vypočítán přenos vibrací včetně zapojeného obvodu se zápornou kapacitou a bez něj. Frekvenční závislost přenosu je znázorněna na Obr. 13. Detail frekvenční závislosti v oblasti rezonanční frekvence přenosu bimorfu je na Obr.14.



Obr. 13: Přenos bimorfu – včetně a bez tlumení

Největších hodnot přenosu dosahoval bimorf, když se frekvence funkčního generátoru shodovala s vlastními kmity piezoelektrického bimorfu – bimorf byl v rezonanci. V rezonanci i relativně malá velikost budící síly obvykle způsobuje velké změny v kmitání a tudíž je nutné v těchto oblastech změny kmitání pozorně sledovat.

Po připojení tlumicího obvodu došlo k potlačení vibrací při rezonanční frekvenci 115 Hz z původní hodnoty přenosu 25,23 na přenos 10,2. Zároveň se však rezonanční frekvence bimorfu posunula na 121 Hz.



Obr. 14: Detail rezonanční frekvence přenosu bimorfu – včetně a bez tlumení

2.4.2 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem – teoretický výpočet

V této kapitole provedeme simulaci frekvenční závislosti přenosu vibrací bimorfem, kterou pak porovnáme s výsledky přenosu zjištěného experimentem v předchozí kapitole.

Přenos vibrací bimorfem lze zjistit z teoretického vzorce [9]. Přenos vibrací je definován jako poměr vibrací volného konce x_L a vibrací vetknutého konce x_0 bimorfu.

Sledovali jsme tedy výchylky volného a vetknutého konce bimorfu v jedné ose vzhledem k bimorfu. Výchylku znázorňuje Obr. 11. Přenos byl:

$$Tr = \frac{x_L}{x_0} = \frac{\cos \Omega L + \cosh \Omega L}{1 + \cos \Omega L \cosh \Omega L + M \Omega L (\cos \Omega L \sinh \Omega L - \cosh \Omega L \sin \Omega L)} \quad (12)$$

$$\text{kde } \Omega = \sqrt{\left(\frac{\omega}{a}\right)} \quad (13)$$

$$\text{parametr } a = \sqrt{\left(\frac{YJ}{\rho S}\right)} \quad (14)$$

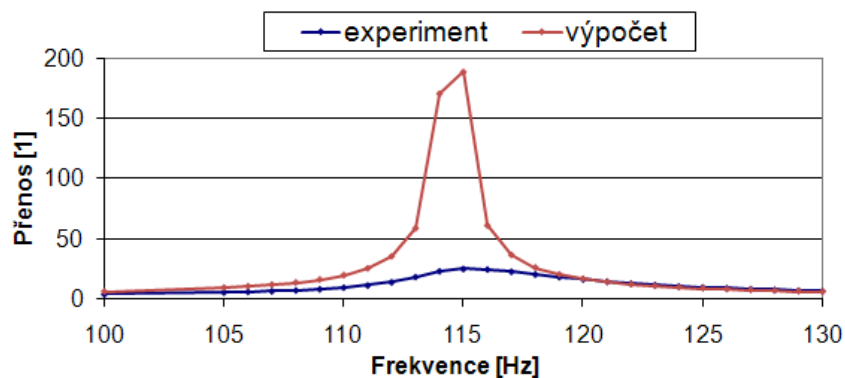
$$\text{hmotnost } M = \frac{m_L}{m_B} \quad (15)$$

kde m_B je hmotnost samotného bimorfu, m_L je hmotnost závaží umístěného na volném konci bimorfu - v našem případě se jedná o hmotnost hliníkového alobalu umístěného na volném konci bimorfu (alobal byl na volný konec umístěn kvůli zajištění odrazu světla fotonického senzoru). Při velikosti hliníkového alobalu 5x5mm a tloušťce 1 μ m, hustotě hliníku 2,7 g/cm³ byla určena hmotnost hliníkového alobalu $m_L=6,75 \times 10^{-5}$ g (hmotnost oboustranné lepicí pásky, kterou je alobal na bimorf přilepen je zanedbávána), průřez $S=2wh$,

$$\text{moment setrvačnosti } J = \frac{2wh^3}{3} \quad (16)$$

přičemž h je šířka bimorfu a w je tloušťka bimorfu, ω je úhlová frekvence, L je volná délka bimorfu (měřeno od místa uchycení do volného konce bimorfu), dále ρ je hustota PZT keramiky z které je bimorf vyroben.

Výpočet přenosu tímto způsobem zanedbává vliv střední kovové elektrody bimorfu. Pomocí hodnot z tabulek 1-1 a 1-2 byly do vzorce pro přenos vibrací (12) nařizovány tyto parametry: hustota PZT keramiky $\rho=7905 \text{ kgm}^{-3}$, Youngův modul pružnosti $Y=60 \text{ GPa}$,



Obr. 15: Přenos vibrací bimorfem – porovnání naměřených dat experimentem a dat vypočtených - bez uvažovaného vnitřního tlumení

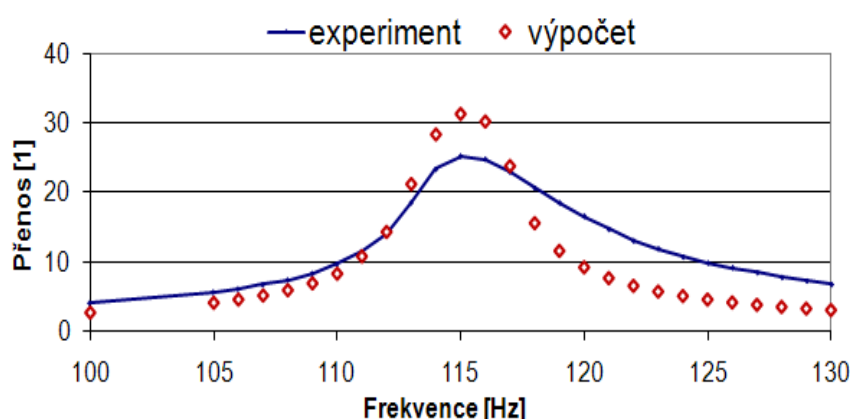
Z Obr. 15 je patrné, že pokud v teoretickém výpočtu neuvažujeme tlumení piezoelektrického materiálu způsobené vnitřním třením materiálu, model dosahuje v rezonanční frekvenci 115Hz vysoké hodnoty přenosu 188,83.

Pokud uvažujeme tlumení způsobené vnitřním třením materiálu je pak Youngův modul pružnosti komplexní a je dán ze vztahu

$$Y = \frac{1}{s_{11}^E \left(1 + \frac{j}{Q_m} \right)} \quad (17)$$

kde Q_m je činitel jakosti spočítán jako podíl reálné složky modulu pružnosti (charakterizující pevnostní vlastnosti materiálu) a imaginární složky modulu pružnosti (charakterizující tlumící vlastnosti materiálu), s_{11}^E je činitel elastické pružnosti.

Pro přenos vibrací s uvažovaným tlumením byly zjištěny tyto parametry: hustota PZT keramiky $\rho=8100\text{kgm}^{-3}$, komplexní Youngův modul pružnosti $Y=(58,9+j14,7)\text{GPa}$



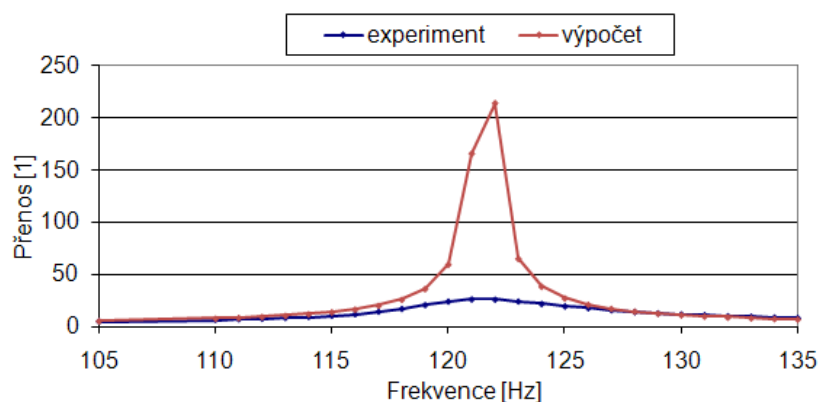
Obr. 16: Přenos vibrací bimorfem – porovnání naměřených dat experimentem a dat vypočtených – včetně uvažovaného vnitřního tlumení

2.4.3 Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem – teoretický výpočet včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou

V této kapitole byl zvolen obdobný postup jako v kapitole 2.4.2, avšak teoretický výpočet přenosu byl porovnáván s naměřenými hodnotami přenosu s připojeným obvodem se zápornou kapacitou. Po připojení obvodu se zápornou kapacitou se změní efektivní hodnota Youngova modulu Y a dojde k posunu rezonanční frekvence bimorfu. Snahou v této části je identifikovat změnu Youngova modulu. Rezonanční frekvence bimorfu je po připojení obvodu se zápornou kapacitou 121Hz s přenosem 26,1.

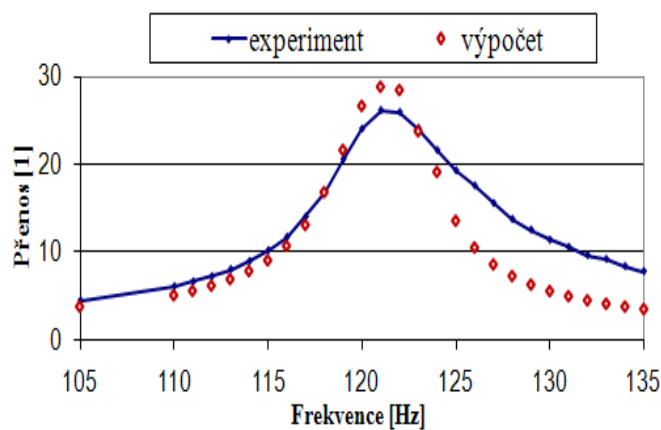
Po nařizování těchto parametrů: hustota PZT keramiky $\rho=7905\text{kgm}^{-3}$, Youngův modul pružnosti $Y=81,8\text{GPa}$ byl v rezonanční frekvenci 121Hz vypočítán přenos vibrací 283. Tato relativně velká hodnota přenosu vzhledem k naměřenému přenosu je opět způsobena

neuvažovaným tlumením materiálu. Porovnání naměřeného přenosu a vypočteného teoreticky včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou je zobrazeno na Obr. 17.



Obr. 17: Přenos vibrací bimorfem – porovnání naměřených dat experimentem a dat vypočtených teoreticky - včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou

Pokud opět uvažujeme komplexní Youngův modul pružnosti ve vzorci (12) použijeme vztah (17) po nastavení hodnot $\rho=8070\text{kgm}^{-3}$, komplexní youngův modul pružnosti $Y=(81,9+j31,3)\text{GPa}$.



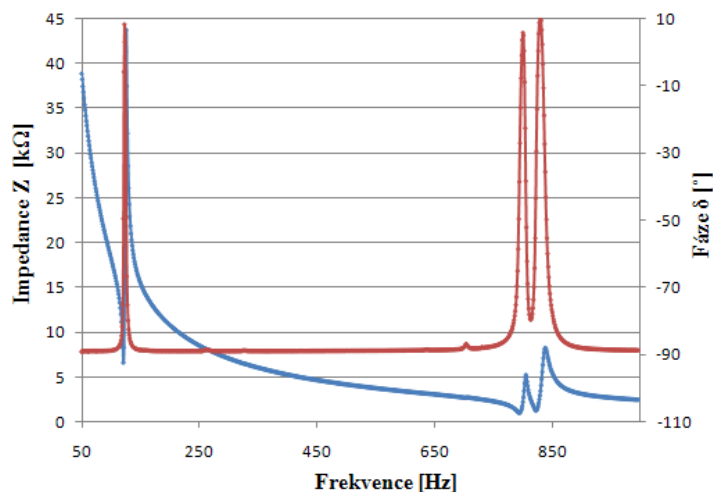
Obr. 18: Přenos vibrací bimorfem se zapojeným obvodem se zápornou kapacitou – porovnání naměřených dat experimentem a dat vypočtených – včetně uvažovaného vnitřního tlumení

2.5 Měření kapacity piezoelektrického bimorfu

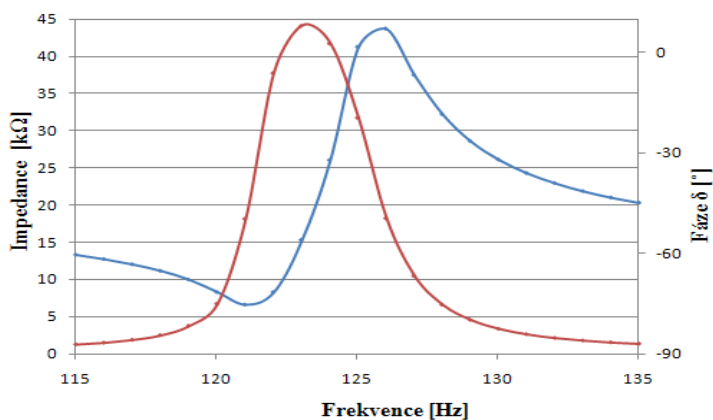
Kapacita piezoelektrického bimorfu byla zjištěna dvěma způsoby, jednak měřením na spektrálním analyzátoru a zadruhé přímým měřením časového průběhu proudu a napětí bimorfem s využitím lock-in zesilovače.

2.5.1 Měření kapacity bimorfu na spektrálním analyzátoru

Piezoelektrický bimorf byl připojen na spektrální analyzátor HP 4195A. Analyzátozem byla změřena fáze a absolutní hodnota impedance bimorfu v kmitočtovém rozsahu 50 až 1000 Hz (**Obr. 19**). První rezonanční frekvence bimorfu byla zjištěna při 123Hz (**Obr. 20**). Další rezonanční frekvence byly zjištěny při 800 a 830 Hz.

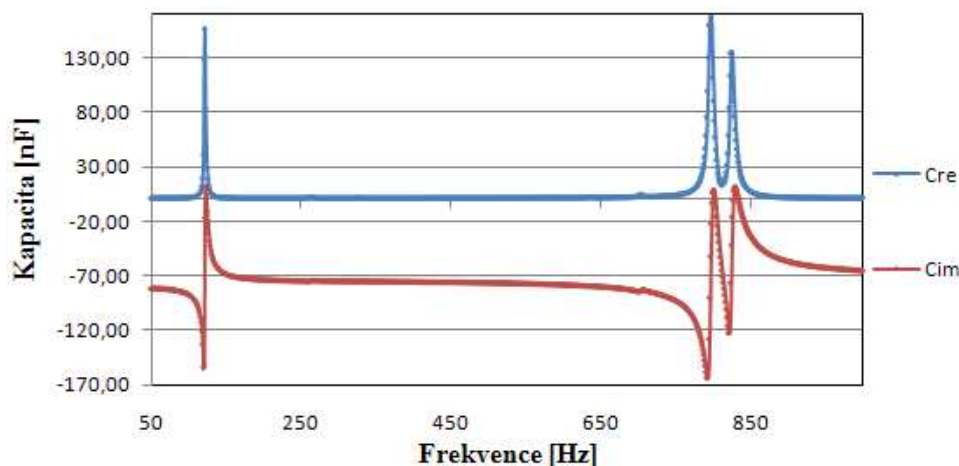


Obr. 19: Impedance Z (modrou barvou) a fáze δ (červenou barvou) bimorfu



Obr. 20: Impedance Z (modrou barvou) a fáze δ (červenou barvou) bimorfu v okolí 1. rezonance

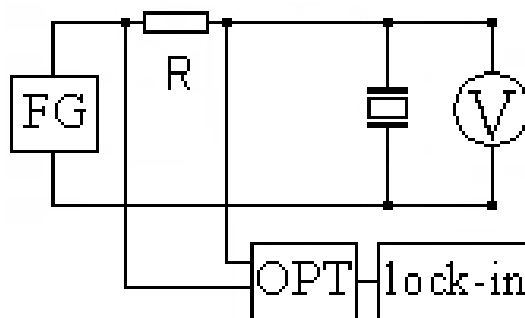
Z naměřených hodnot impedance a fáze bimorfu byla spočítána kapacita bimorfu. Kapacitu lze z impedance vyjádřit vztahem $C = 1 / j\omega Z$ (18). Po dosazení za $Z = |Z|e^{j\delta}$ (19) a úpravě dostaneme výsledný výraz pro kapacitu bimorfu $C = -je^{-j\delta} / \omega |Z|e^{j\delta}$ (20). Z tohoto výrazu byla spočítána reálná a imaginární kapacita bimorfu jejichž frekvenční závislost je na Obr. 21.



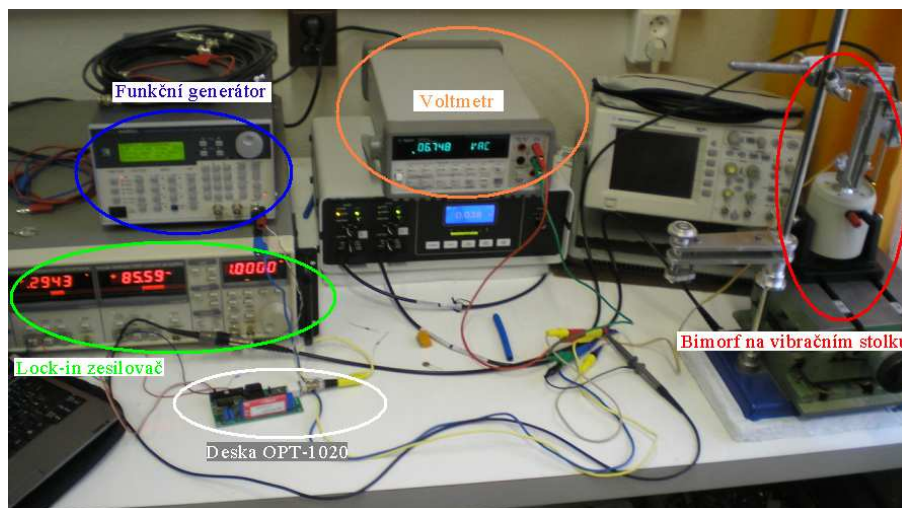
Obr. 21: Reálná a imaginární kapacita bimorfu

2.5.2 Měření kapacity piezoelektrického bimorfu pomocí lock-in zesilovače

Piezoelektrický bimorf byl připojen na funkční generátor GX 1010 METEX který generoval 7V střídavého napětí v rozsahu frekvencí 50-1000 Hz. Při měření byl do měřícího obvodu (Obr. 22) zapojen rezistor R o hodnotě 100Ω . Na rezistoru bylo pomocí externí desky OPT-1020 obsahující izolační zesilovač s vysokou linearitou (a zesílením 10) zesíleno elektrické napětí které bylo dále změřeno na lock-in zesilovači SR830 DSP. Na tomto lock-in zesilovači jsme zároveň s měřením elektrického napětí změřili i fázi. Fotografie realizovaného zapojení pro měření kapacity bimorfu je na Obr. 23.

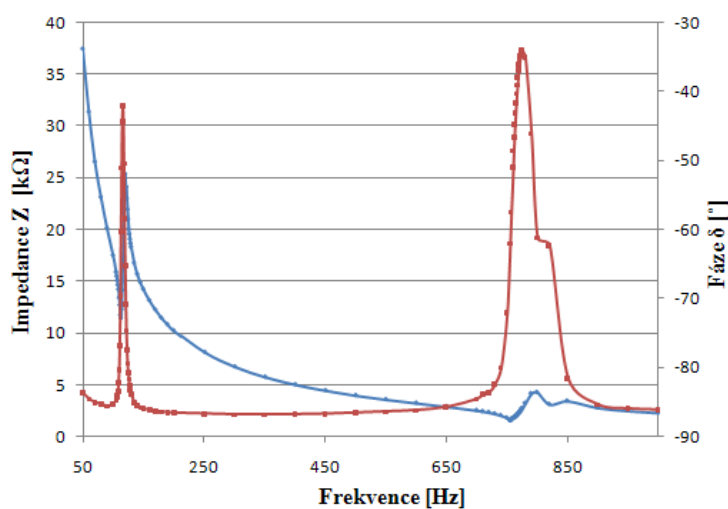


Obr. 22: Zapojení pro měření kapacity bimorfu



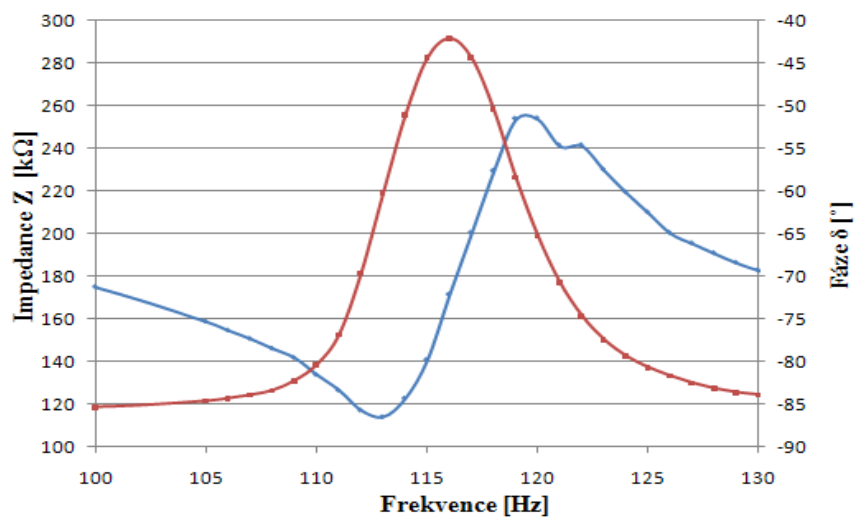
Obr. 23: Fotografie zapojení pro měření kapacity bimorfu

Byl změřen úbytek napětí a fáze na rezistoru R , z čehož lze vypočítat proud, který rezistorem prochází, a pokud bylo změřeno napětí na bimorfu, lze z těchto hodnot vypočítat impedanci bimorfu. Impedance a fáze bimorfu je v celém měřicím kmitočtovém rozsahu zobrazena na Obr. 24.



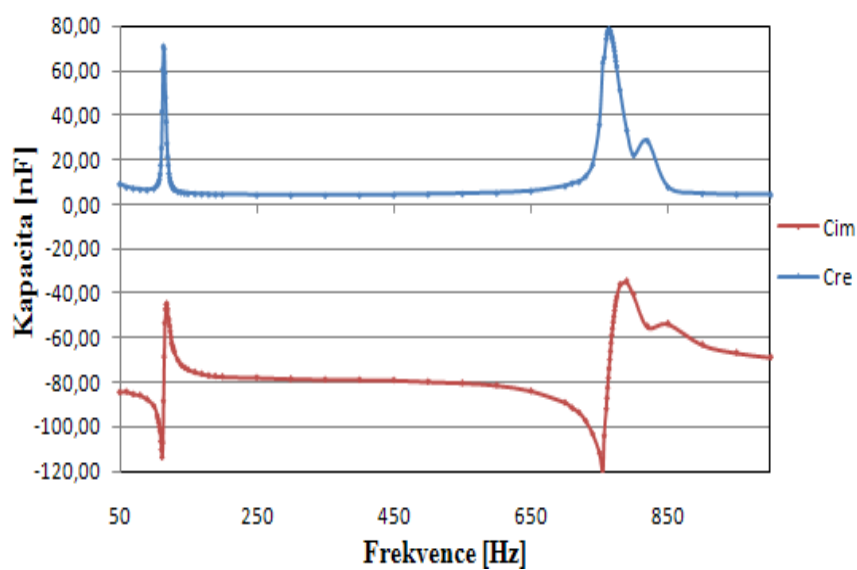
Obr. 24: Impedance Z (modrou barvou) a fáze δ (červenou barvou) bimorfu

Protože na předchozím obrázku není dostatečně zřetelná impedance Z a fáze δ bimorfu v rezonanční frekvenci 115 Hz, je vhodné uvést detailnější zobrazení-což je na Obr. 25.



Obr. 25: Impedance Z (modrou barvou) a fáze δ (červenou barvou) bimorfu v okolí 1.rezonance

Změřená impedance a fáze byli podle vzorce (20) z předchozí kapitoly přepočítány na kapacitu a z té byl pak určena reálná a imaginární kapacita, která je zobrazena na Obr. 26.



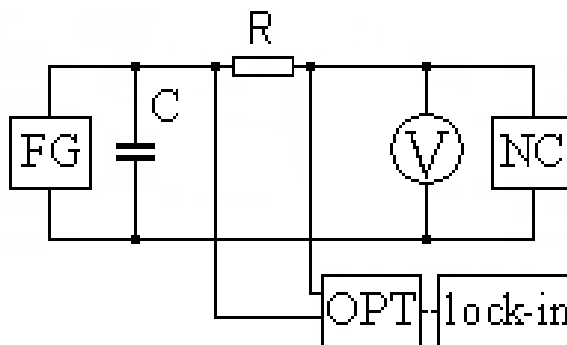
Obr. 26: Reálná a imaginární kapacita bimorfu

2.6 Zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou

V této kapitole je popsáno zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou provedeným experimentem a tato kapacita je pak ověřena teoretickým výpočtem.

2.6.1 Zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou - experimentem

Byl zapojen měřicí obvod podle kapitoly 2.5.2, avšak namísto bimorfu byl zapojen obvod se zápornou kapacitou.



Obr. 27: Zapojení pro měření kapacity obvodu se zápornou kapacitou

Do obvodu byl paralelně k funkčnímu generátoru zapojen kondenzátor $C = 47\text{nF}$. Od vypočtené kapacity se odečetla kapacita tohoto kondenzátoru a dostali jsme výslednou kapacitou obvodu se zápornou kapacitou. Obvod byl měřen při jeho naladění na maximální tlumení přenosu vibrací bimorfu na rezonanční frekvenci 115 Hz.

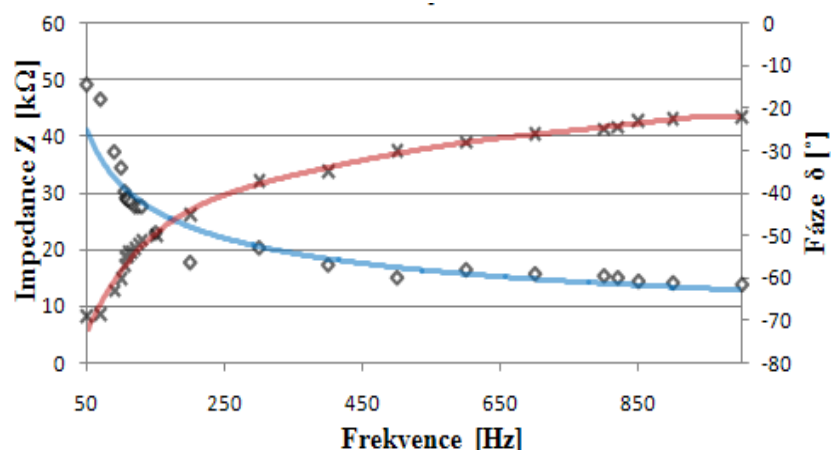
Vztah pro změřenou kapacitu C_Z vychází ze vztahu $C = 1 / j\omega Z$. Po dosazení za

$Z = |Z|e^{j\delta}$ dostaneme že $C_Z = 1 / j\omega|Z|e^{j\delta}$ což po úpravách a dosazení za $-j = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ vede

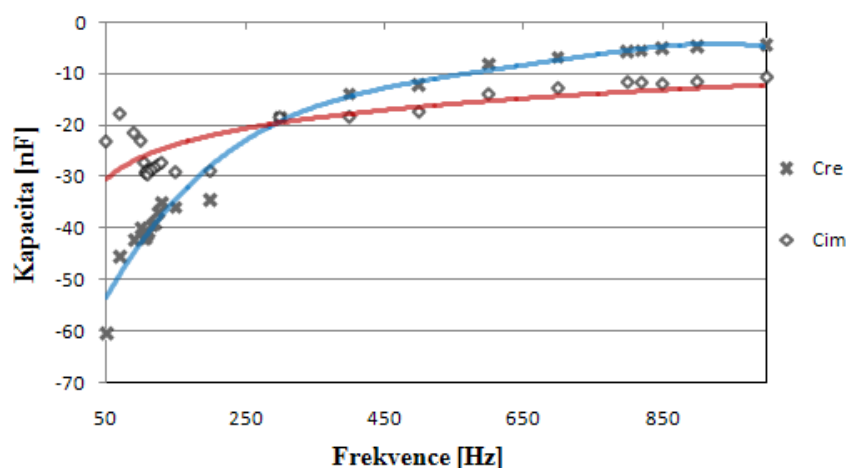
$$\text{ke kapacitě } C_Z = \frac{1}{\omega|Z|} e^{-j\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right)} \quad (21).$$

Po odečtení kapacity kondenzátoru C od změřené kapacity C_Z je výsledná kapacita obvodu se zápornou kapacitou tedy: $C_{NC} = C_Z - C$ (22). Jako součet reálné a imaginární kapacity je pak kapacita obvodu $C_{NC} = C_{Re} + C_{Im}$ (23).

Na Obr. 28 a Obr. 29 jsou znázorněné frekvenční závislosti impedance, fáze, reálná a imaginární kapacity obvodu se zápornou kapacitou proložené křivkami nelineární regrese.



Obr. 28: Impedance Z (modrou barvou) a fáze δ (červenou barvou) obvodu se zápornou kapacitou



Obr. 29: Reálná a imaginární kapacita obvodu se zápornou kapacitou-experiment

2.6.2 Zjištění kapacity obvodu se zápornou kapacitou – výpočet

Vycházeli jsme ze vzorce (1.10) pro kapacitu obvodu $C_{NC} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{C_0}{1 + j\omega R_0 C_0}$.

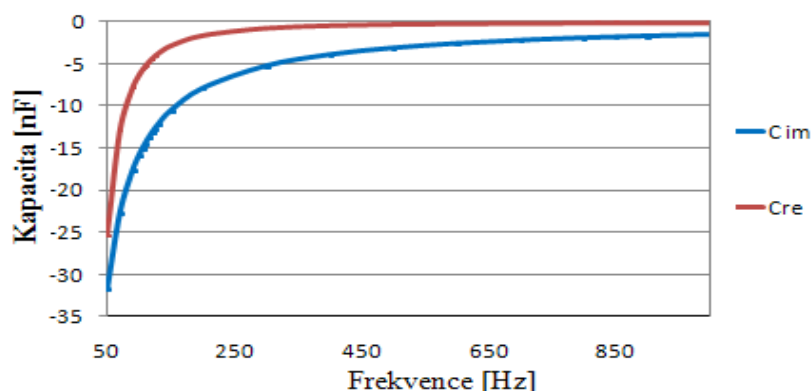
Pokud si určíme za efektivní kapacitu $C_{0eff} = R_2 C_0 / R_1$ (24) je pak kapacita rovna

$$C_{NC} = -\frac{C_{0eff}}{1 + j\omega R_0 C_0} \quad (25).$$

Po vynásobení komplexně sdruženým číslem $1 - j\omega R_0 C_0 / 1 - j\omega R_0 C_0$ a po úpravách dostaneme vztah pro kapacitu obvodu vyjádřenou jako součet reálné a imaginární kapacity:

$$C_{NC} = -\frac{C_{0eff}}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2} - j \frac{\omega R_0 C_0 C_{0eff}}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2} \quad (26).$$

Pro hodnoty $R_1=100\text{ k}\Omega$, $R_2=100\text{ }\Omega$, $R_0=100\text{ k}\Omega$ a $C_0=40\text{ nF}$ byla spočítána reálná a imaginární kapacita obvodu se zápornou kapacitou a tato je zobrazena na Obr. 30.

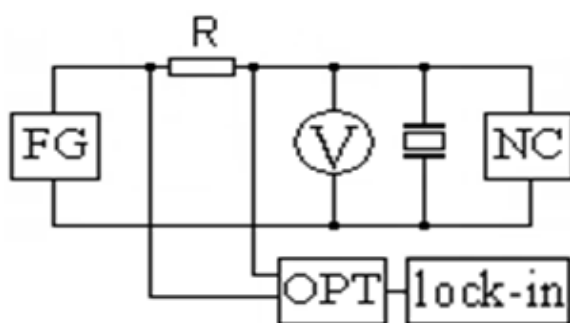


Obr. 30: Reálná a imaginární kapacita obvodu se zápornou kapacitou - výpočet

2.7 Měření kapacity bimorfu připojeného k obvodu se zápornou kapacitou

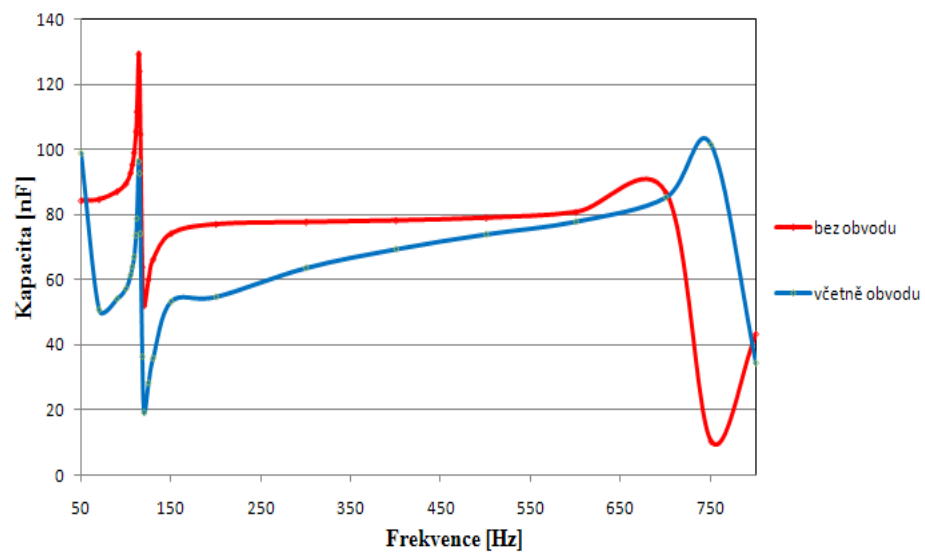
Piezoelektrický bimorf byl vystaven mechanickému buzení představující připojení vibračního stolku s bimorfem na funkční generátor. Budící amplituda kmitů byla 10V. Do obvodu byl zapojen obvod se zápornou kapacitou, který byl naladěn tak, aby dosahoval maximálního tlumení při 1. rezonanční frekvenci bimorfu.

Po naladění tlumícího obvodu byl funkční generátor připojen na elektrody bimorfu. Generátor budil bimorf elektricky napětím o amplitudě 7V v kmitočtovém rozsahu 50-1000Hz. Schéma zapojení je na Obr. 31.



Obr. 31: Zapojení pro měření kapacity piezoelektrického bimorfu včetně zapojeného obvodu se zápornou kapacitou

Z naměřených hodnot byly podle vzorce (20) spočítány absolutní hodnoty kapacity bimorfu včetně a bez připojeného obvodu se zápornou kapacitou. Na Obr. 32 jsou zobrazeny absolutní hodnoty kapacity bimorfu kde je patrná změna kapacity bimorfu po připojení tlumícího obvodu.



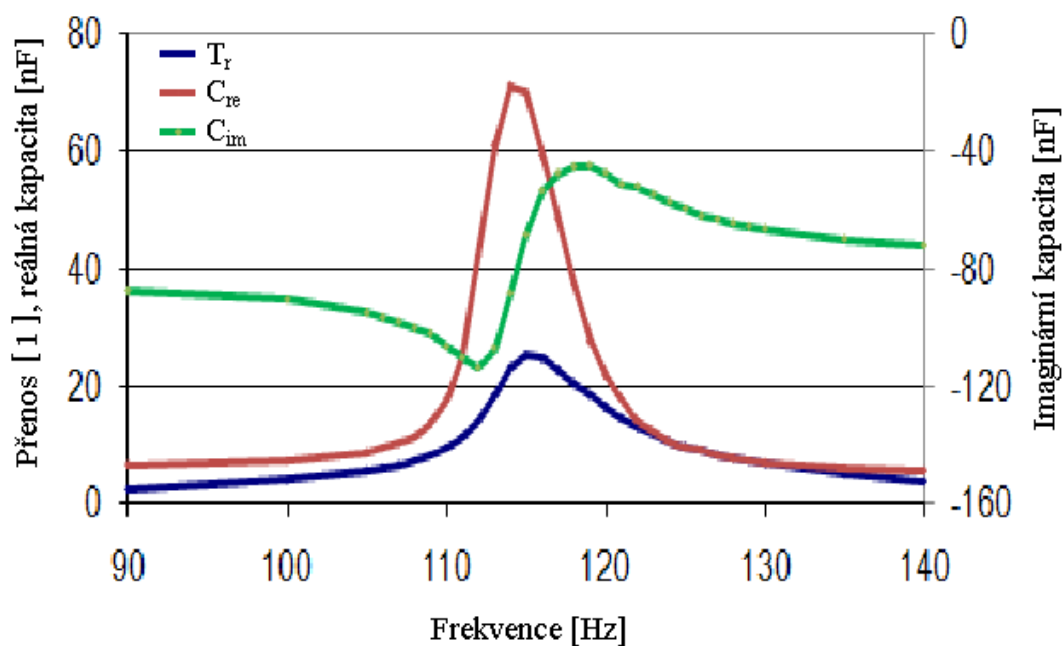
Obr. 32: Absolutní hodnoty kapacity piezoelektrického bimorfu včetně a bez zapojeného obvodu se zápornou kapacitou

3 Diskuze výsledků

V rezonanční frekvenci 115 Hz byl změřen přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem 25,2. Po připojení obvodu se zápornou kapacitou došlo ke změně Youngova modulu pružnosti bimorfu. Což má za následek posun rezonanční frekvence na 121Hz. S připojeným obvodem došlo k potlačení přenosu na 10,2 v rezonanční frekvenci 115Hz, avšak na frekvenci 121Hz byl přenos 26,1. Z původní hodnoty Youngova modulu pružnosti $Y=60\text{GPa}$ byla identifikována změna po uvažování tlumení na $Y=(58,9+j14,7)\text{GPa}$.

S připojeným obvodem se zápornou kapacitou byla zjištěna $Y=81,8\text{GPa}$, s uvažovaným tlumením materiálu $Y=(81,9+j31,3)\text{GPa}$.

Byla změřena kapacita piezoelektrického bimorfu. V rezonanční frekvenci 115 Hz dosahovala reálná kapacita bimorfu 70nF, imaginární kapacita -68nF. Naměřený přenos bimorfu a jeho reálná a imaginární kapacita jsou vyobrazeny na následném obrázku.



Obr. 33: Přenos T_r , reálná kapacita C_{re} a imaginární kapacita C_{im} piezoelektrického bimorfu

Ve frekvenci 115Hz byla experimentem zjištěna reálná kapacita obvodu se zápornou kapacitou -39,5, imaginární pak -28,7. Hodnoty kapacit obvodu byly ověřeny teoretickým výpočtem. Absolutní hodnota kapacity bimorfu v okolí rezonanční frekvence 115 Hz se vlivem připojení obvodu sníží o zhruba 30nF.

Závěr

V diplomové práci byly shrnuty základní vlastnosti piezoelektrických materiálů pro uspořádání do piezoelektrických kompozitních struktur. Dále byl popsán princip aktivního řízení elastických vlastností těchto struktur při připojení zpětnovazebního obvodu a jeho využívání pro tlumení přenosu vibrací.

Byl sestaven obvod realizující zápornou kapacitu pomocí zpětnovazebního obvodu s operačním zesilovačem. Tento obvod pokrýval frekvenční oblast rezonanční frekvence piezoelektrického bimorfu. Obvod byl realizován na nepájivém poli a byla ověřena jeho funkčnost.

Bylo provedeno měření kapacity a měření výchylky volného konce bimorfu včetně a bez připojeného obvodu se zápornou kapacitou. Z dosažených výsledků je patrné, že shoda reálných a imaginárních složek kapacit piezoelektrického prvku a obvodu se zápornou kapacitou je při tlumení vibrací klíčová. Systém, který této shody dosáhne, je v současnosti vyvíjen na Ústavu mechatroniky a technické informatiky. Vlastnosti vyvinutého semi-aktivního systému tlumení budou určující pro jeho praktické využití v budoucnosti.

Použitá literatura:

- [1] J.Zelenka: Sto let od objevení piezoelektřiny, slaboproudý obzor, 1980
- [2] Electronic design, dostupné z <http://electronicdesign.com> , 1.4.2010
- [3] P. Půlpán, J. Erhart: Piezoelektrické „chytré“ materiály pro elektrotechniku, Elektro 11, 4-7 , 2002
- [4] datasheet k piezoekeramice NCE55, dostupný z <http://www.noliac.com>, 18.2.2010
- [5] P. Půlpán, J. Erhart: Parametry piezoelektrických bimorfů, Elektro 3, 4-7, 2002
- [6] P.Mokrý, T. Sluka, K. Nováková, M. Kodejška: Vibration Control Using Piezoelectric Actuators, Piezo 2007- Liberec
- [7] L. Raulímová: Návrh a realizace obvodu se zápornou kapacitou pro systém aktivního potlačení vibrací pomocí piezoelektrických materiálů, Diplomová práce, TU v Liberci 2006
- [8] datasheet LF 356, dostupný z <http://www.datasheetcatalog.com> , 5.2.2010
- [9] P. Mokrý, J. Erhart, M. Pustka: Vibration Control Using Piezoelectric Bimorphs Connected to Negative Capacitance Circuits – International Center for Piezoelectric Research, KFY TUL - piezoelektrický seminář, 17.3.2009
- [10] P. Mokrý- soukromé sdělení
- [11] J.G. Smiths and A.Ballato: Journal of Microelectromechanical Systems, 3 (3), 105-112, 1994
- [12] M. Date, M. kutani and S. Sakai: J. Appl. Phys., 87(2), 863-868 , 2000
- [13] S.O.Reza Moheimani and Andrew J. Fleming: Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping (Advances in Industrial Control), Springer- Verlag London Limited, 2006

Seznam příloh:

Příloha č. 1: - Tabulka 3 - Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem - experiment +
teoretický výpočet - bez obvodu se zápornou kapacitou

Příloha č. 2: - Tabulka 4 - Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem - experiment +
teoretický výpočet - včetně obvodu se zápornou kapacitou

Příloha č. 3: - Tabulka 5 - Kapacita piezoelektrického bimorfu změřená na lock-in
zesilovači

Příloha č. 4: - Tabulka 6 - Kapacita obvodu se zápornou kapacitou - experiment

Příloha č. 5: - Tabulka 7 - Kapacita obvodu se zápornou kapacitou - výpočtem

Příloha č. 6: - Tabulka 8 - Kapacita bimorfu včetně a bez připojeného k obvodu se
zápornou kapacitou

Přílohy :

Příloha č. 1: - Tabulka 3 - Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem - experiment +
teoretický výpočet - bez obvodu se zápornou kapacitou

Frekvence [Hz]	Výchylka pevného konce [μm]	Výchylka volného konce [μm]	Poměr přenosu experime nt	Poměr přenosu teorie	Frekvence [Hz]	Výchylka pevného konce [μm]	Výchylka volného konce [μm]	Poměr přenosu experime nt	Poměr přenosu teorie
50	998	1255	1,26	1,36	500	1,8	0	0,00	1,44
60	995	1248	1,25	1,59	550	1,5	0	0,00	1,84
70	170	284	1,67	1,93	600	1,3	0	0,00	2,60
80	109	222	2,04	2,48	650	1,2	0	0,00	4,52
90	77	198	2,57	3,52	700	1,1	2	1,82	17,48
100	58	239	4,12	6,01	710	1,1	0	0,00	40,27
105	51	290	5,69	9,24	750	1	0	0,00	9,77
106	50,1	308	6,15	10,34	760	1,1	0	0,00	7,49
107	48,8	329	6,74	11,74	770	1	1	1,00	6,09
108	47,5	353	7,43	13,56	780	1,1	3	2,73	5,14
109	46,5	388	8,34	16,05	781	1,1	4	3,64	5,06
110	45,1	438	9,71	19,63	782	1,2	4	3,33	4,98
111	44	507	11,52	25,25	783	1,1	5	4,55	4,91
112	42,7	605	14,17	35,33	784	1,2	5	4,17	4,84
113	41,5	770	18,55	58,62	785	1,2	6	5,00	4,77
114	40,7	950	23,34	170,73	786	1,2	6	5,00	4,70
115	40,3	1017	25,24	188,83	787	1,2	7	5,83	4,64
116	40,1	994	24,79	60,98	788	1,2	8	6,67	4,57
117	39,7	912	22,97	36,43	789	1,3	9	6,92	4,51
118	39,1	806	20,61	26,01	790	1,3	11	8,46	4,45
119	38,3	710	18,54	20,24	791	1,4	12	8,57	4,39
120	37,5	623	16,61	16,58	792	1,4	14	10,00	4,34
121	36,7	540	14,71	14,06	793	1,4	16	11,43	4,28
122	35,9	469	13,06	12,21	794	1,4	17	12,14	4,23
123	35	417	11,91	10,79	795	1,3	18	13,85	4,17
124	34,3	368	10,73	9,68	796	1,2	17	14,17	4,12
125	33,4	330	9,88	8,78	797	1,1	16	14,55	4,07
126	32,5	299	9,20	8,03	798	1	15	15,00	4,03
127	31,7	269	8,49	7,41	799	1	14	14,00	3,98
128	31	242	7,81	6,88	800	0,9	13	14,44	3,93
129	30,3	221	7,29	6,42	801	0,8	12	15,00	3,89
130	29,8	202	6,78	6,02	802	0,8	11	13,75	3,84
135	27,1	137	5,06	4,62	803	0,7	9	12,86	3,80
140	26,6	104	3,91	3,77	804	0,7	8	11,43	3,76
145	24,5	81	3,31	3,20	805	0,6	7	11,67	3,72
150	22,5	62	2,76	2,79	806	0,6	6	10,00	3,68
160	18,5	39	2,11	2,25	807	0,6	5	8,33	3,64
170	16,6	27	1,63	1,92	808	0,6	4	6,67	3,60
180	14,5	20	1,38	1,69	809	0,6	3	5,00	3,56
190	12,8	15	1,17	1,52	810	0,6	3	5,00	3,53
200	11,5	12	1,04	1,40	820	0,8	2	2,50	3,20
250	6,7	11	1,64	1,09	830	1	3	3,00	2,94
300	5,3	1	0,19	1,01	840	0,9	2	2,22	2,71
350	3,5	2	0,57	1,01	850	0,9	1	1,11	2,53
400	2,7	0	0,00	1,08	900	0,8	0	0,00	1,90
450	2,2	0	0,00	1,21	950	0,8	0	0,00	1,56
					1000	0,8	0	0,00	1,35

Příloha č. 2: - Tabulka 4 - Přenos vibrací piezoelektrickým bimorfem - experiment +
teoretický výpočet - včetně obvodu se zápornou kapacitou

Frekvence [Hz]	Výchylka pevného konce [μm]	Výchylka volného konce [μm]	Poměr přenosu experiment	Poměr přenosu teorie	Frekvence [Hz]	Výchylka pevného konce [μm]	Výchylka volného konce [μm]	Poměr přenosu experiment	Poměr přenosu teorie
50	856	1085	1,27	1,31	797	1,1	2	1,82	8,76
70	168,9	276	1,63	1,76	800	1,2	2,5	2,08	8,08
90	75,9	187	2,46	2,86	802	1,2	3	2,50	7,69
100	56,9	198	3,48	4,23	804	1,3	3	2,31	7,33
110	43,6	266	6,10	8,06	805	1,3	3	2,31	7,17
111	42,6	283	6,64	8,85	807	1,5	5	3,33	6,86
112	41,7	301	7,22	9,82	808	1,5	6	4,00	6,71
113	40,7	327	8,03	11,01	809	1,5	6	4,00	6,57
114	39,5	354	8,96	12,53	810	1,3	5	3,85	6,44
115	38,4	392	10,21	14,54	811	1,1	3	2,73	6,31
116	37	434	11,73	17,29	812	1	2	2,00	6,19
117	35,7	501	14,03	21,32	813	0,9	1	1,11	6,07
119	33,8	696	20,59	39,78	814	0,8	1	1,25	5,96
120	33,3	801	24,05	69,86	815	0,8	1	1,25	5,85
121	33,1	866	26,16	283,49	820	0,8	0	0,00	5,36
122	33,3	864	25,95	138,48	825	0,9	1	1,11	4,95
123	33,5	808	24,12	55,77	830	0,9	2	2,22	4,60
124	33,5	724	21,61	34,97	835	0,9	3	3,33	4,29
125	33,1	639	19,31	25,49	840	0,9	4	4,44	4,03
126	32,2	566	17,58	20,08	842	0,9	5	5,56	3,93
128	31,1	428	13,76	14,12	845	0,9	7	7,78	3,80
129	30,4	381	12,53	12,30	846	0,9	8	8,89	3,75
130	29,7	338	11,38	10,91	847	0,8	9	11,25	3,71
131	29,2	309	10,58	9,80	848	0,9	11	12,22	3,67
132	28,7	277	9,65	8,90	849	0,8	15	18,75	3,63
133	27,7	255	9,21	8,16	850	0,9	20	22,22	3,59
135	26,7	209	7,83	6,99	851	0,9	22	24,44	3,55
140	25,6	144	5,63	5,18	852	1	23	23,00	3,51
145	23,1	106	4,59	4,14	853	1	22	22,00	3,48
150	20	78	3,90	3,46	854	1,1	21	19,09	3,44
160	19	51	2,68	2,64	855	1	21	21,00	3,41
170	16,2	35	2,16	2,16	856	1,1	19	17,27	3,37
180	14,2	25	1,76	1,85	857	1,1	19	17,27	3,34
200	11,3	15	1,33	1,48	858	1,1	17	15,45	3,31
250	7	5	0,71	1,10	859	1,1	16	14,55	3,27
300	5,1	3	0,59	0,97	860	1	15	15,00	3,24
350	3,5	2	0,57	0,95	861	1	14,5	14,50	3,21
400	2,8	1	0,36	0,98	862	1	13	13,00	3,18
450	2,5	0	0,00	1,07	863	1	12	12,00	3,15
500	1,9	0	0,00	1,22	864	1	12	12,00	3,12
550	1,6	0	0,00	1,46	865	1	11	11,00	3,09
600	1,5	0	0,00	1,88	870	1	8	8,00	2,96
650	1,2	0	0,00	2,71	875	0,9	6	6,67	2,84
700	1,2	0	0,00	4,91	880	1	4	4,00	2,72
750	1,1	0,5	0,45	26,31	890	1	2,5	2,50	2,53
780	1,1	1	0,91	16,75	900	0,9	2	2,22	2,36
790	1,1	1	0,91	10,89	950	0,9	0	0,00	1,79

Příloha č. 3: -Tabulka 5 - Kapacita piezoelektrického bimorfu změřená na lock-in zesilovači

f [Hz]	Ur [V]	Ir [mA]	δ [°]	C [nF]	Cre [nF]	Cim [nF]	f [Hz]	Ur [V]	Ir [mA]	δ [°]	C [nF]	Cre [nF]	Cim [nF]
50	4,84	0,01	-83,65	8,49	9,39	-84,41	250	4,83	0,06	-86,73	7,80	4,45	-77,89
60	4,84	0,02	-84,58	8,45	7,98	-84,11	300	4,83	0,07	-86,84	7,85	4,33	-78,41
70	4,84	0,02	-85,06	8,56	7,37	-85,27	350	4,83	0,08	-86,86	7,88	4,32	-78,70
80	4,84	0,02	-85,34	8,60	6,99	-85,71	400	4,83	0,10	-86,82	7,90	4,38	-78,85
90	4,84	0,02	-85,62	8,78	6,70	-87,52	450	4,83	0,11	-86,74	7,91	4,50	-79,02
100	4,83	0,03	-85,37	9,09	7,34	-90,57	500	4,82	0,12	-86,59	7,98	4,75	-79,70
105	4,83	0,03	-84,66	9,53	8,87	-94,93	550	4,82	0,13	-86,42	8,04	5,02	-80,27
106	4,83	0,03	-84,35	9,69	9,54	-96,46	600	4,82	0,15	-86,22	8,15	5,37	-81,31
107	4,83	0,03	-83,96	9,85	10,36	-97,96	650	4,82	0,17	-85,76	8,41	6,21	-83,83
108	4,83	0,03	-83,41	10,06	11,55	-99,98	700	4,80	0,19	-84,58	8,95	8,45	-89,05
109	4,83	0,03	-82,25	10,28	13,86	-101,85	710	4,80	0,20	-83,9	9,19	9,76	-91,36
110	4,83	0,04	-80,39	10,79	18,01	-106,37	720	4,80	0,20	-83,64	9,40	10,41	-93,39
111	4,82	0,04	-76,88	11,29	25,64	-110,00	730	4,78	0,22	-82,47	9,81	12,85	-97,22
112	4,82	0,04	-69,66	12,10	42,04	-113,41	740	4,77	0,23	-80,02	10,46	18,13	-103,05
113	4,81	0,04	-60,25	12,31	61,08	-106,86	750	4,71	0,26	-72,06	11,72	36,09	-111,47
114	4,80	0,04	-51,13	11,34	71,19	-88,32	755	4,17	0,27	-62,03	13,65	64,02	-120,55
115	4,80	0,03	-44,4	9,80	70,04	-68,59	757	4,61	0,27	-57,51	12,31	66,13	-103,84
116	4,81	0,03	-42,13	8,00	59,29	-53,63	760	4,58	0,26	-50,95	11,83	74,54	-91,89
117	4,81	0,02	-44,44	6,79	48,45	-47,51	761	4,58	0,25	-48,62	11,60	76,71	-87,07
118	4,82	0,02	-50,49	5,88	37,41	-45,37	762	4,57	0,25	-46,65	11,33	77,75	-82,37
119	4,82	0,02	-58,47	5,27	27,56	-44,92	763	4,57	0,24	-44,8	11,09	78,68	-78,14
120	4,83	0,02	-65,31	5,22	21,82	-47,45	764	4,57	0,24	-43,18	10,80	78,76	-73,91
121	4,83	0,02	-70,8	5,45	17,92	-51,47	765	4,57	0,23	-41,7	10,51	78,48	-69,93
122	4,83	0,02	-74,69	5,40	14,27	-52,11	766	4,57	0,23	-40,35	10,22	77,91	-66,19
123	4,83	0,02	-77,48	5,63	12,20	-54,92	767	4,58	0,22	-39,1	9,89	76,72	-62,34
124	4,83	0,02	-79,41	5,85	10,74	-57,47	768	4,58	0,21	-38	9,59	75,59	-59,06
125	4,83	0,02	-80,73	6,06	9,76	-59,83	769	4,58	0,21	-37	9,30	74,28	-55,97
126	4,83	0,02	-81,72	6,30	9,07	-62,36	770	4,59	0,20	-36,15	9,01	72,74	-53,14
127	4,83	0,02	-82,55	6,41	8,31	-63,52	771	4,59	0,19	-35,5	8,72	70,97	-50,62
128	4,83	0,03	-83,2	6,51	7,71	-64,65	772	4,60	0,19	-34,9	8,43	69,10	-48,21
129	4,83	0,03	-83,65	6,61	7,31	-65,72	773	4,60	0,18	-34,47	8,10	66,79	-45,85
130	4,83	0,03	-83,92	6,69	7,08	-66,51	774	4,61	0,18	-34,16	7,81	64,59	-43,83
135	4,83	0,03	-85,09	7,03	6,01	-69,99	775	4,62	0,17	-34,02	7,51	62,25	-42,02
140	4,83	0,03	-85,51	7,24	5,67	-72,23	780	4,66	0,14	-35,11	6,31	51,64	-36,30
145	4,83	0,03	-85,8	7,36	5,39	-73,39	790	4,72	0,11	-46,14	4,83	33,45	-34,81
150	4,83	0,03	-85,99	7,44	5,20	-74,24	800	4,75	0,11	-61,23	4,65	22,36	-40,72
160	4,83	0,04	-86,2	7,55	5,01	-75,37	820	4,73	0,15	-62,34	6,20	28,78	-54,92
170	4,83	0,04	-86,36	7,63	4,85	-76,17	850	4,80	0,14	-81,53	5,42	7,98	-53,61
180	4,83	0,04	-86,45	7,70	4,77	-76,89	900	4,81	0,17	-85,41	6,32	5,06	-63,02
190	4,83	0,04	-86,52	7,73	4,69	-77,17	950	4,81	0,19	-86	6,69	4,66	-66,71
200	4,83	0,05	-86,59	7,76	4,61	-77,43	1000	4,81	0,21	-86,16	6,88	4,61	-68,68

Příloha č. 4: - Tabulka 6 - Kapacita obvodu se zápornou kapacitou - experiment

f [Hz]	Ur [mV]	Unc [V]	δ [°]	Z [k Ω]	C [nF]	Cre [nF]	Cim [nF]
50	14	6,87	-69	49,07	64,87	-60,56	-23,25
70	14,8	6,88	-68,6	46,49	48,91	-45,54	-17,85
90	18,5	6,88	-63	37,19	47,55	-42,37	-21,59
100	20	6,88	-60	34,40	46,27	-40,07	-23,13
105	22,8	6,88	-57	30,18	50,23	-42,13	-27,36
107	23,7	6,88	-55	29,03	51,24	-41,97	-29,39
109	23,8	6,88	-55	28,91	50,51	-41,38	-28,97
110	24	6,88	-54	28,67	50,47	-40,83	-29,67
115	24,3	6,88	-54	28,31	48,88	-39,55	-28,73
120	25	6,88	-53	27,52	48,19	-38,99	-28,33
125	25	6,88	-52	27,52	46,27	-36,95	-27,84
130	25	6,88	-51	27,52	44,49	-35,06	-27,39
150	30	6,86	-50	22,87	46,40	-36,06	-29,20
200	39	6,88	-45	17,64	45,11	-34,56	-29,00
300	34	6,88	-37	20,24	26,22	-18,54	-18,54
400	40	6,88	-35	17,20	23,13	-13,92	-18,47
500	46	6,87	-30	14,93	21,31	-12,22	-17,46
600	42	6,87	-28	16,36	16,22	-8,11	-14,04
700	44	6,87	-26	15,61	14,56	-6,84	-12,86
800	45	6,87	-25	15,27	13,03	-5,71	-11,71
820	46	6,87	-24,5	14,93	13,00	-5,49	-11,78
850	48	6,87	-23	14,31	13,08	-5,11	-12,04
900	49	6,87	-22,5	14,02	12,61	-4,83	-11,65
1000	50	6,87	-22	13,74	11,58	-4,34	-10,74

Příloha č. 5: - Tabulka 7 - Kapacita obvodu se zápornou kapacitou - výpočet

f [Hz]	Cre [nF]	Cim [nF]
50	-25,33	-31,83
70	-12,92	-22,74
90	-7,82	-17,68
100	-6,33	-15,92
105	-5,74	-15,16
107	-5,53	-14,87
109	-5,33	-14,60
110	-5,23	-14,47
115	-4,79	-13,84
120	-4,40	-13,26
125	-4,05	-12,73
130	-3,75	-12,24
150	-2,81	-10,61
200	-1,58	-7,96
300	-0,70	-5,31
400	-0,40	-3,98
500	-0,25	-3,18
600	-0,18	-2,65
700	-0,13	-2,27
800	-0,10	-1,99
820	-0,09	-1,94
850	-0,09	-1,87
900	-0,08	-1,77
1000	-0,06	-1,59

Příloha č. 6: - Tabulka 8 - Kapacita bimorfu včetně a bez připojeného k obvodu se zápornou kapacitou

	bez obvodu			včetně obvodu		
f [Hz]	Ir [mA]	δ [°]	C [nF]	Ir [mA]	δ [°]	C [nF]
50	64	-81,3	84,2	75	-82,3	98,6
70	90	-83,2	84,6	54	-87,7	50,7
90	119	-84,2	87,0	74	-91,7	54,1
100	136	-84,4	89,4	87	-92,9	57,2
105	148	-84	92,7	98	-92,1	61,4
107	155	-83,6	95,3	104	-91,6	63,9
109	164	-83,3	99,0	111	-90,6	67,0
111	178	-81,6	105,5	124	-88,1	73,5
112	190	-79,4	111,6	134	-85,4	78,7
114	223	-63,7	129,2	166	-66,3	96,2
115	215	-50,3	124,0	161	-44	92,5
116	183	-40,1	104,6	130	-7,7	74,0
118	114	-40,3	63,8	65	-15,5	36,4
120	94,8	-58,9	52,0	35	-45	19,3
125	114,1	-78,7	60,0	54	-93	28,4
130	130,7	-82,5	66,1	71	-98,2	35,9
150	169	-85,1	74,1	122	-100	53,3
200	234	-86	76,9	167	-103	54,7
300	354	-86,6	77,6	291	-164	63,5
400	475	-86,7	78,1	425	-102	69,3
500	600	-86,7	78,9	566	-100	73,8
600	736	-86,5	80,7	715	-98,3	77,7
700	922	-85,5	86,6	914	-95,3	85,2
750	116	-82	10,3	1155	-90	101,3
800	515	-44	43,2	414	-59,7	34,5
810	594	-62,4	49,0	559	-78,7	45,6
815	675	-64,7	55,4	657	-76,1	53,5
818	712	-63,1	58,5	663	-72,6	54,0
821	709	-60,8	58,0	628	-71	50,9
826	635	-60,5	51,4	548	-74,8	44,0
830	588	-65	47,2	528	-81,7	42,0
850	663	-81,1	51,5	677	-94,4	52,2
900	851	-85	62,4	870	-96,7	63,3
1000	1036	-86,2	68,4	1068	-95,5	69,7